



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO

“Criterios de diseño de envolvente higrotérmica libre de moho”

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN HÁBITAT SUSTENTABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

AUTOR: Alejandro Reyes Riveros
Ingeniero Constructor

PROF. GUÍA: Sr. Ariel Bobadilla Moreno
Ingeniero Civil Mecánico
Doctor en Ciencias Aplicadas de la Ingeniería
Universidad Católica de Lovaina, Bélgica

PROF. CO-GUÍA: Sr. Martin H. Spitzner
Ingeniero en Física de la Construcción
Master en sonido y vibración, Universidad de Southampton, Inglaterra
Doctor en Ciencias Aplicadas de la Ingeniería, Universidad Técnica de Clausthal, Alemania

Concepción, 09 de marzo de 2020

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo llega a buen puerto gracias al apoyo de muchas personas, quienes me han acompañado y ayudado de muchas formas.

A mi profesor guía don Ariel Bobadilla por apoyarme en todo, a los trabajadores del CITEC y a cada profesor y colaborador del programa de magíster, así como a mis compañeros por su profesionalismo y calidad humana.

Especial agradecimiento también a mi profesor co-guía Martin H. Spitzner quien me apoyó en mi estadía en Alemania, al igual que a la dirección de postgrados de la Universidad quienes me apoyaron en la pasantía de investigación.

Sobre todo, este trabajo está dedicado a mi familia, a mis padres, hermanas y a Karen a quienes agradezco su apoyo incondicional y especialmente a mi hijo Santiago quien me llenó de energía para seguir adelante.

“-¿Cómo puedo descubrir mi verdadera voluntad?

-Siguiendo el camino de los deseos, de uno a otro hasta llegar al último...

-No me parece muy difícil...

-Es el más peligroso de todos los caminos ”

La historia interminable, Michael Ende

RESUMEN

El moho presente en los materiales de una vivienda provoca daños y deterioro en los elementos que la componen y puede perjudicar la salud del individuo que la habita. Todas las decisiones y actividades de diseño en la construcción y gestión afectan el riesgo de crecimiento del moho. Es así que se hace necesario conocer la naturaleza del microorganismo moho y del material sobre el cual se formará, además de los factores dentro del entorno de las condiciones ambientales fluctuantes en el que se encuentra.

La normativa nacional existente no ha logrado limitar la formación de moho, en una encuesta realizada en Temuco y Padre Las Casas se determinó que la mitad de las viviendas encuestadas presentaban problemas de postventas relacionadas con la humedad y casi un cuarto reportó problemas de deterioro y manchas en los revestimientos de pinturas y papel mural.

Se requiere un mayor desarrollo de las normativas y el establecimiento de criterios que permitan el diseño de una envolvente higrotérmica libre de moho. Los nuevos requerimientos de eficiencia energética contenidos en el PDA podrían empeorar la situación actual además de dejar obsoletos algunos sistemas constructivos.

La normativa internacional, el estado del arte y las herramientas de cálculo dinámico de condensaciones y formación de moho pueden ayudar a definir estos criterios de diseño.

En esta investigación se experimenta con un elemento muro tipo estándar PDA y se evalúa con 4 diferentes sustratos de revestimiento interior: esmalte al agua común (EAC), papel mural vinilizado (PMV), esmalte al agua antimoho (EAA) y papel mural común (PMC).

Sobre estos 4 casos se realizan cálculos teóricos y experimentos prácticos en laboratorio que permitan determinar el riesgo de condensaciones y formación de moho. El cálculo estático se realiza con el método Glaser, según NCh1973:2014 y en base a una herramienta diseñada por la DITEC. El cálculo dinámico se realiza con los softwares WUFI Pro, WUFI Bio y WUFI VTT. El experimento se realiza en la cámara de clima controlado del laboratorio CITEC de la Universidad del Bío Bío en la ciudad de Concepción, Chile.

Los resultados obtenidos se comparan entre los diferentes cálculos, experimento, normativas existentes y el estado de arte relacionado. El análisis y discusión de los resultados incluye un análisis de sensibilidad y una posible modelación estadística predictiva de la formación de moho.

El revestimiento EAC es el caso que alberga menos agua. El EAA por su parte es el que resulta con mayor contenido de agua, tanto en la solución constructiva total como en la capa subyacente (el yeso cartón). El contenido de agua de la capa subyacente y su fluctuación en el tiempo dependen directamente del tipo de revestimiento de terminación elegido.

Los cálculos dinámicos y experimento en laboratorio además coinciden en que las fluctuaciones en el contenido de agua del EAC son las menos variables y las del EAA, seguidas del PMV son las más acentuadas. Lo anterior permite concluir que el EAC permite un secado más rápido o bien frena el vapor de agua de tal manera que sus fluctuaciones de contenido de agua son menos acentuadas.

A pesar de las fluctuaciones más acentuadas, el revestimiento EAA es el que presenta un mejor desempeño frente a la formación de moho y por el contrario el revestimiento EAC es el de peor desempeño. Esto es consecuente entre los resultados de curva de isopletas, tasa e índice de crecimiento de moho.

La comparación de los casos de revestimientos y variaciones evaluadas permite concluir que la principal causa de formación de moho se basa en los valores elevados de humedad relativa interior, luego el siguiente caso sería el tipo de revestimiento existente, su origen y sensibilidad. Los cálculos realizados entonces demuestran la importancia de dos pilares fundamentales para una envolvente libre de moho: el ambiente interior y el sustrato.

Se puede observar que un valor de espesor equivalente de aire (S_d) más alto no garantiza una baja formación de moho, según los gráficos resulta que entre más alto el valor de S_d , más alto es el valor de índice y tasa de crecimiento de moho (IC y RC). También a mayor S_d resulta un mayor contenido de agua.

Como conclusión se tienen tres pilares sobre los cuales se sustentan los criterios de diseño de una envolvente libre de moho. Cada uno de ellos es igual de importante:

Ambiente interior: Dentro de los parámetros ambientales el agua es crucial para la formación de moho, se deben limitar los niveles de humedad relativa, contenido de agua inicial de los materiales y los periodos o picos de humedad relativa alta. El camino para lograrlo es la ventilación.

Envolvente térmica: Si se evitan las condensaciones con un factor de resistencia térmica adecuado, para la sección tipo y para los puentes térmicos, se disminuyen las posibilidades de formación de moho. El camino para lograrlo es un buen dimensionamiento de la envolvente térmica y optimización de puentes térmicos.

Sustrato o material de revestimiento de terminación interior: El efecto de la ventilación en ambientes interiores altamente aislados (es decir cumpliendo los dos pilares anteriores) es sólo menor en términos de su potencial para reducir los riesgos de crecimiento de moho. El control real y sostenido del moho en interiores en tales ambientes debe tener en cuenta la dinámica de la humedad interior, y por lo tanto debe considerar la aplicación apropiada de materiales de terminación como el instrumento clave.

Para cada uno de estos pilares se establecen propuestas específicas sobre los instrumentos y herramientas actualmente existentes: 1) *Modificación herramienta de cálculo estático* 2) *Modificación y complemento de los requerimientos de EE de los PDA* y 3) *Establecimiento de los requerimientos del sustrato o recubrimiento de terminación*.

Palabras clave: Formación de moho, condensación superficial, patologías viviendas, sustrato, simulación higrotérmica dinámica.

ABSTRACT

Mould present in the materials of a house causes damage and deterioration in the elements that compose it and can harm the health of the individual who lives there. All design decisions and activities in construction and management affect the risk of mold growth. Thus, it is necessary to know the nature of the mould microorganism and the material on which it will form, as well as the factors within the environment of the fluctuating environmental conditions in which it is found.

The existing national regulations have not been able to limit the formation of mould, in a survey carried out in Temuco and Padre Las Casas it was determined that half of the surveyed dwellings presented post-sale problems related to humidity and almost a quarter reported problems with deterioration and stains in paint and wallpaper coatings.

Further development of regulations and the establishment of criteria to enable the design of a mould-free hygrothermal envelope is required. The new energy efficiency requirements contained in the PDA could worsen the current situation, in addition to rendering some construction systems obsolete.

International standards, the state of the art and dynamic calculation tools for condensation and mould formation can help to define these design criteria.

In this research, a standard PDA-type wall element is experimented with and evaluated against 4 different interior cladding substrates: common water-based paint (EAC), vinyl wallpaper (PMV), water-based anti-mould paint (EAA) and common wallpaper (PMC).

Theoretical calculations and practical laboratory experiments are carried out on these 4 cases to determine the risk of condensation and mould formation. The static calculation is made with the Glaser method, according to NCh1973:2014 and based on a tool designed by DITEC. The dynamic calculation is carried out with the software WUFI Pro, WUFI Bio and WUFI VTT. The experiment is carried out in the climate controlled chamber of the CITEC laboratory at the University of Bío Bío in the city of Concepción, Chile.

The results obtained are compared between the different calculations, experiment, existing regulations and the related state of the art. The analysis and discussion of the results include a sensitivity analysis and a possible predictive statistical modeling of mold formation.

The EAC coating is the least water-bearing case. The EAA is the case with the highest water content, both in the total building solution and in the underlying layer (the plasterboard). The water content of the underlying layer and its fluctuation over time depend directly on the type of finishing plaster chosen.

Dynamic calculations and laboratory experiments further agree that the fluctuations in water content of EAC are the least variable and those of EAA, followed by PMV, are the most pronounced. This leads to the conclusion that EAC allows faster drying or slows down water vapor so that its water content fluctuations are less accentuated.

In spite of the more pronounced fluctuations, the EAA coating is the best performer against mold formation, while the EAC coating is the worst performer. This is consistent between the results of the isopleth curve, rate, and rate of mold growth.

The comparison of the cases of coatings and variations evaluated allows us to conclude that the main cause of mould formation is based on the high values of interior relative humidity, then the next case would be the type of existing coating, its origin and sensitivity. The calculations made then demonstrate the importance of two fundamental pillars for a mould-free envelope: the indoor environment and the substrate.

It can be seen that a higher equivalent air thickness (S_d) value does not guarantee low mould growth, as the graphs show that the higher the S_d value, the higher the mould index and growth rate (IC and RC) value. The higher the S_d , the higher the water content.

In conclusion, there are three pillars on which the design criteria for a mould-free enclosure are based. Each of them is equally important:

Indoor environment: Within the environmental parameters, water is crucial for the formation of mould, the levels of relative humidity, initial water content of the materials and the periods or peaks of high relative humidity must be limited. The way to achieve this is through ventilation.

Thermal enclosure: Avoiding condensation with a suitable thermal resistance factor, for the type section and for thermal bridges, reduces the chances of mould formation. The way to achieve this is by a good dimensioning of the thermal enclosure and optimization of thermal bridges.

Substrate or interior finishing lining material: The effect of ventilation in highly insulated interior environments (i.e. fulfilling the two previous pillars) is only minor in terms of its potential to reduce the risks of mould growth. Actual and sustained indoor mould control in such environments must take into account the dynamics of indoor humidity, and therefore must consider the appropriate application of finishing materials as the key tool.

For each of these pillars, specific proposals are established for the currently existing instruments and tools: 1) Modification of static calculation tool 2) Modification and addition of EE requirements of PDAs and 3) Establishment of substrate or finish coating requirements.

Keywords: Mold formation, surface condensation, housing pathologies, substrate, dynamic hygrothermal simulation.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Schimmel, der in den Materialien eines Hauses vorhanden ist, verursacht Schäden und Verschlechterung der Elemente, aus denen es besteht, und kann die Gesundheit des Menschen, der dort lebt, beeinträchtigen. Alle Designentscheidungen und Aktivitäten in Konstruktion und Management beeinflussen das Risiko der Schimmelbildung. Daher ist es notwendig, die Art des Schimmelpilz-Mikroorganismus und das Material, auf dem er sich bildet, sowie die Faktoren in der Umgebung der schwankenden Umweltbedingungen, in denen er sich befindet, zu kennen.

Die bestehenden nationalen Vorschriften konnten die Schimmelbildung nicht einschränken, in einer in Temuco und Padre Las Casas durchgeführten Umfrage wurde festgestellt, dass die Hälfte der untersuchten Wohnungen nach dem Verkauf Probleme mit der Feuchtigkeit und fast ein Viertel Probleme mit dem Verfall und Fleckenbildung der Anstriche und Tapeten aufwies.

Eine Weiterentwicklung der Vorschriften und die Festlegung von Kriterien, die die Gestaltung einer schimmelpilzfreien hygrothermischen Gebäudehülle ermöglichen, ist erforderlich. Die im PDA (Regierungsprogramm für die Atmosphärische Dekontamination von MP10 und MP2.5) enthaltenen neuen Anforderungen an die Energieeffizienz könnten die derzeitige Situation verschlimmern und einige Bausysteme überflüssig machen.

Internationale Normen, der Stand der Technik und dynamische Berechnungstools für Kondensation und Schimmelbildung können helfen, diese Auslegungskriterien zu definieren.

In dieser Untersuchung wird ein Standard-PDA-Wandelement mit 4 verschiedenen Substrat für Innenverkleidungen experimentiert und bewertet: gewöhnlicher Wasserfarbe (EAC), Vinyltapete (PMV), wässere Anti-Schimmel-Farbe (EAA) und gewöhnliche Tapete (PMC).

An diesen 4 Fällen werden theoretische Berechnungen und praktische Laborversuche durchgeführt, um die Gefahr von Kondenswasser- und Schimmelbildung zu ermitteln. Die statische Berechnung erfolgt mit der Glaser-Methode nach NCh1973:2014 und basiert auf einem von DITEC entwickelten Tabelle. Die dynamische Berechnung wird mit den Programmen WUFI Pro, WUFI Bio und WUFI VTT durchgeführt. Das Experiment wird in der Klimakammer des CITEC-Labors an der Universität Bío Bío in der Stadt Concepción, Chile, durchgeführt.

Die erzielten Ergebnisse werden zwischen den verschiedenen Berechnungen, Versuchen, bestehenden Vorschriften und dem jeweiligen Stand der Technik verglichen. Die Analyse und Diskussion der Ergebnisse beinhaltet eine Sensitivitätsanalyse und eine mögliche statistische Vorhersagemodellierung der Schimmelbildung.

Die EAC-Beschichtung weist den geringsten Wassergehalt auf, die EAA Beschichtung den Höchsten, sowohl im gesamten Bauteil, als auch in der darunter liegenden Schicht (der Gipskartonplatte). Der Wassergehalt der darunter liegenden Schicht und seine zeitlichen Schwankungen hängen direkt von der Art des gewählten Beschichtung ab.

Dynamische Berechnungen und Laborexperimente stimmen weiterhin darin überein, dass die Schwankungen des Wassergehalts von EAC am wenigsten und die der EAA, gefolgt von PMV, am stärksten ausgeprägt sind. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass EAC eine schnellere Trocknung ermöglicht oder den Wasserdampf verlangsamt, so dass dessen Wassergehaltsschwankungen weniger stark ausgeprägt sind.

Trotz der stärkeren Schwankungen ist die EAA-Beschichtung der beste Performer gegen Schimmelbildung, während die EAC-Beschichtung der schlechteste Performer ist. Dies ist konsistent zwischen den Ergebnissen der isopleth Kurve, Rate und Index des Schimmelpilzwachstums.

Der Vergleich der Fälle von Beschichtungen und der bewerteten Variationen lässt den Schluss zu, dass die Hauptursache der Schimmelbildung auf den hohen Werten der relativen Innenfeuchtigkeit beruht, dann wäre der nächste Fall die Art der vorhandenen Beschichtung, ihre Herkunft und Empfindlichkeit. Die dann durchgeführten Berechnungen zeigen die Bedeutung von zwei Grundpfeilern für eine schimmelfreie Hülle: das Raumklima und der Substrat.

Es ist zu erkennen, dass ein höherer Wert der äquivalenten Luftdicke (S_d) kein geringes Schimmelpilzwachstum garantiert. Aus den Diagrammen geht hervor, dass der Schimmelpilzindex (Mould Growth Index) und die Wachstumsrate (IC und RC) umso höher sind, je höher der S_d -Wert ist. Je höher der S_d , desto höher der Wassergehalt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Designkriterien für ein schimmelfreie Gebäudehülle auf drei Säulen beruhen. Jeder von ihnen ist gleich wichtig:

Raumklima: Innerhalb der Umweltparameter ist Wasser entscheidend für die Schimmelbildung, die Höhe der relativen Luftfeuchtigkeit, der anfängliche Wassergehalt der Materialien und die Perioden oder Spitzen hoher relativer Luftfeuchtigkeit müssen begrenzt werden. Der Weg dorthin führt über die Belüftung.

Thermische Hülle (Wärmedämmung): Die Vermeidung von Kondenswasser mit einem angemessenen Wärmewiderstandsfaktor für den normale Bauteil sowie für die Wärmebrücken verringert die Gefahr der Schimmelbildung. Der Weg dazu ist eine gute Dimensionierung der Wärmedämmung und die Optimierung von Wärmebrücken.

Substrat oder Innenauskleidungsmaterial: Die Wirkung der Belüftung in hoch isolierten Innenräumen (d.h. die Erfüllung der beiden vorhergehenden Säulen) ist nur gering im Hinblick auf ihr Potenzial, die Risiken von Schimmelbildung zu reduzieren. Die tatsächliche und nachhaltige Schimmelbekämpfung in solchen Umgebungen muss die Dynamik der Raumluftfeuchtigkeit berücksichtigen und daher die geeignete Anwendung von Veredelungsmaterialien als das Schlüsseltabelle betrachten.

Für jede dieser Säulen werden spezifische Vorschläge für die derzeit in Chile verfügbaren Instrumente und Tabellen erstellt: 1) Modifikation des statischen Berechnungstools, 2) Modifikation und Ergänzung der Energieeffizienzanforderungen von PDAs und 3) Festlegung der Anforderungen an das Substrat oder die Endbeschichtung.

Schlagwörter: Schimmelpilzbildung, Kondensät, Gehäusepathologien, Substrat, dynamische hygrothermische Simulation.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. FORMULACIÓN GENERAL DEL PROBLEMA.....	13
1.2. HIPÓTESIS	15
1.3. OBJETIVOS	15
1.3.1. Objetivo general	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
1.4. METODOLOGIA.....	15
Etapa 1: Estado del arte.....	16
Etapa 2: Cálculo de condensación y formación de moho	16
Etapa 3: Evaluación experimental de condensación y formación de moho	17
Etapa 4: Análisis de resultados y propuesta de criterios de envolvente higrotérmica libre moho	17
CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA.....	20
2.1. EL MOHO	20
2.1.1. CONDICIONES AMBIENTALES	23
2.1.1.1. EL AGUA.....	25
2.1.2. EL SUSTRATO	32
2.1.3. LAS PARTÍCULAS AÉREAS	36
2.2. CONSECUENCIA DEL MOHO EN LA SALUD	36
2.3. CONSECUENCIA DEL MOHO EN LA CONSTRUCCIÓN.....	40
2.3.1. Comportamiento de materiales frente a la humedad	41
2.3.2. DAÑOS Y CAMBIOS EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	49
2.4. MODELOS DE CÁLCULO HIGROTÉRMICOS EXISTENTES	50
2.4.1. Cálculo estático.....	50
2.4.2. Cálculo dinámico.....	51
2.5. MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE CRECIMIENTO DE MOHO EXISTENTES.....	53

2.5.1.	Métodos gráficos probabilístico de germinación de moho.....	54
2.5.2.	Modelo Isopletas	56
2.5.3.	Proyecto HAMSTAD	59
2.5.4.	Evaluación de riesgo de germinación de moho.....	60
2.5.5.	Índice de Crecimiento de Moho de Viitanen.....	61
CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE.....		63
3.1.	NORMATIVA RELACIONADA EN CHILE	63
3.1.1.	Artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones	63
3.1.2.	NCh1973:2014	63
3.1.3.	Aplicación NCh1973:2014.....	66
3.1.4.	ESTÁNDAR PLAN DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	67
3.1.5.	ALCANCE DE LA APLICACIÓN DE LOS ESTÁNDARES EN OTRAS NORMATIVAS Y DECRETOS	70
3.2.	NORMATIVA RELACIONADA EN ALEMANIA	70
3.2.1.	DIN 4108-3:2014.....	70
3.2.2.	DIN 4108-8:2010.....	76
CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO		83
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	83
4.2.	CALCULO ESTÁTICO CON HERRAMIENTA DITEC.....	85
4.3.	CÁLCULO DINÁMICO.....	89
4.3.1.	Consideraciones ambientales:.....	90
4.3.2.	Consideraciones del corte constructivo seleccionado	91
4.3.3.	Resultados de la simulación higrotérmica dinámica	92
CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO		103
5.1.	DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO.....	103
5.2.	REGISTRO CLIMÁTICO.....	106
5.3.	REGISTRO DE VARIABLES DEPENDIENTES RESULTANTES.....	107
5.3.1.	Temperatura superficial interior	107

5.3.2. Registro de condensación superficial	108
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	110
6.1. CALCULO ESTÁTICO CON HERRAMIENTA DITEC.....	110
6.2. CÁLCULO DINÁMICO.....	111
6.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	115
6.4. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO	123
6.5. MATRIZ DE RELACIÓN DE VARIABLES	131
6.6. MODELACIÓN ESTADÍSTICA.....	134
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	140
7.1. CONCLUSIONES GENERALES.....	140
7.2. PROPUESTA DE CRITERIOS DE DISEÑO DE ENVOLVENTE HIGROTÉRMICA LIBRE DE MOHO	145
7.2.1. PROPUESTA DE MODIFICACIÓN HERRAMIENTA DE CÁLCULO ESTÁTICO	145
7.2.2. PROPUESTA DE MODIFICACIÓN REQUERIMIENTOS PDA RELACIONADOS	148
7.2.3. REQUERIMIENTOS DEL SUSTRATO O RECUBRIMIENTO DE TERMINACIÓN	149
7.3. TRABAJOS FUTUROS Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	151
LISTADO DE FIGURAS	152
LISTADO DE TABLAS	159
BIBLIOGRAFÍA	161
ANEXOS	167

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. FORMULACIÓN GENERAL DEL PROBLEMA

El crecimiento microbiano en los edificios se ha identificado como la principal causa de los problemas de la calidad del aire interior (IAQ). El moho causa deformación y deterioro del acabado del edificio, daños estructurales, una reducción en la eficacia del aislamiento térmico, descamación de pintura y otros. Más importante aún, investigaciones recientes han demostrado que el crecimiento y la propagación del moho está relacionado con efectos adversos para la salud como asma, tos, sibilancias, y síntomas del tracto respiratorio superior. Estos problemas de salud relacionados con el moho han creado problemas de responsabilidad en la industria de la construcción.

El problema del crecimiento del moho es conocido ya desde hace 5.000 años por nuestros antepasados. Se puede encontrar en la Biblia (Levítico 14: 33-45) el procedimiento para eliminar el crecimiento de moho en casas infectadas. En esa época ya se entendía la gravedad del problema donde se prescribía la eliminación de las manchas contaminadas en las paredes hasta acabar con el moho y si no funcionaba se debía derribar la vivienda y eliminar hasta el último desecho fuera de la ciudad.

En un esfuerzo por reducir los problemas de moho en la industria de la construcción, las normas nacionales e internacionales definen límites superiores a la humedad relativa aceptable en los edificios, basados en las investigaciones que entregaban a este factor la mayor influencia en la formación de moho. Desafortunadamente, este enfoque descriptivo no ha logrado proporcionar un ambiente libre de moho, y muchos edificios modernos continúan sufriendo de niveles dañinos de crecimiento de moho.

Por ejemplo, *Aspergillus fumigatus* puede alimentarse de cualquier planta o material animal no protegido, solo requiere una humedad suficiente. Las viviendas sin control de humedad permiten el ambiente ideal para que *Aspergillus fumigatus* crezca y se multiplique (Graham Atherton 2019).

Investigaciones recientes han demostrado que la ocurrencia de moho está influenciada por una multitud de parámetros con interacciones físicas y biológicas complejas (Burge 2002; Moon y Augenbroe 2003). Como resultado, los problemas de moho no están bien previstos en la etapa de diseño. Además, una vez que se producen en un edificio operativo, es difícil determinar las causas reales y proponer las mejores acciones correctivas. Aktas et al. (2018) demostraron que la falta de moho visible no necesariamente indica bajos niveles de agentes fúngicos en el aire dentro de una propiedad doméstica.

En el caso de Chile, los resultados de una encuesta desarrollada en dos comunas de este país (Temuco y Padre Las Casas) durante el año 2018 determinaron que de las viviendas nuevas entregadas el 83% reportaron problemas de postventas una vez entregadas. Del total de viviendas encuestadas el 50% presentó problemas relacionados con la humedad y el 22% reportó problemas con la pintura y el papel mural destacando que se observaban manchas sobre estos revestimientos.

Actualmente en Chile no existe ninguna normativa de carácter obligatorio que resguarde la no formación de moho en las viviendas, sin embargo, en las ciudades con Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) vigente, se consideran requerimientos que de manera indirecta buscan la reducción de la ocurrencia de condensaciones. La principal medida de eficiencia energética es el aumento de aislación térmica la cual puede llevar a presentar incluso mayores problemas de condensación y moho (BS5250:2011). Los requerimientos del PDA se revisarán en detalle en el capítulo 3.1.4.

Además del aumento en la aislación térmica, dentro de los requerimientos del PDA también se solicita evaluar la ocurrencia de condensaciones y diseñar un sistema de ventilación en base extractores con encendido mediante higróstato.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El diseño de ventilación se debe basar en la normativa chilena NCh3308 o NCh3309 según corresponda, pero de manera obligatoria debe contar el sistema con al menos dos extractores con encendido automático mediante higrostatos ubicados en baño y cocina. La idea de la autoridad es limitar la humedad relativa de la vivienda para a su vez disminuir la ocurrencia de condensaciones. En esta tesis se realizará un análisis de la efectividad de esta medida en el contexto de la formación de moho.

Actualmente, la evaluación de ocurrencia de condensaciones se realiza con una planilla de cálculo, la cual permite realizar una evaluación de condensaciones de manera estática basada en el método Glaser, según NCh1973:2014, la cual se basa a su vez en la ISO 13788:2012. Esta herramienta puede calcular las condensaciones para un mes con temperaturas críticas y con condiciones ambientales definidas. Si sobre un corte constructivo determinado, la herramienta establece que existe riesgo de condensaciones, entonces ese corte constructivo no se puede utilizar como solución constructiva. El problema existente en esta evaluación es que los análisis estáticos se basan en experimentos que no toman en cuenta todos los factores, como por ejemplo el tiempo de exposición (Vereecken and Roels 2012) donde el agua acumulada puede alcanzar a secarse, presentándose agua neta cero al final del ciclo. Además del problema ya mencionado, existe otra probable deficiencia en la metodología, esto es que, a pesar de no acumularse agua al final del ciclo y no existir riesgo de condensación, no hay seguridad en que no exista proliferación de patógenos. Por ejemplo, puede que no exista condensación pero si se puedan producir filtraciones al interior del corte constructivo de precipitaciones (Bustamante Gómez et al. 2009).

Actualmente se dispone de métodos de evaluación disponibles que utilizan modelos higrotérmicos basados en los principios físicos de primer orden de transferencia de calor y masa. Un buen ejemplo es WUFI, (Künzel (1995) y Karagiozis (2001)), que resuelve las ecuaciones de transferencia de masa y calor acoplados no lineales en geometrías locales unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D).

Si bien estos métodos de evaluación higrotérmicos son mucho más precisos en la predicción de formación de moho, el enfoque no incluye incertidumbres relacionadas con la variación natural de las propiedades de los materiales de construcción, parámetros físicos y biológicos, desviación operativa de las especificaciones de diseño, etc. De hecho, el crecimiento del moho suele ocurrir de forma inesperada y, en muchos casos, inexplicablemente debido a desviaciones imprevistas del supuesto punto de operación idealizado del edificio.

Todas las decisiones y actividades de diseño en la construcción y gestión de edificios afectan el riesgo de crecimiento del moho final. Ejemplos de tales decisiones y actividades son el diseño inapropiado de componentes de construcción, la construcción e instalación defectuosa de los sistemas de envolvente y ventilación, la selección de materiales de construcción inadecuados, la mala gestión de los materiales de construcción en la obra, funcionamiento inadecuado del sistema de climatización y mantenimiento inadecuado del edificio, y así sucesivamente.

Es así que se hace necesario además conocer la naturaleza del microorganismo moho y del material sobre el cual se formará, ambos factores dentro del entorno de condiciones ambientales además fluctuantes (Pasanen et al. 2000).

Como se verá más adelante, los requerimientos que se establecen en el PDA provienen de la nueva reglamentación térmica de Chile que en un futuro próximo será obligatoria para todas las viviendas nuevas del país. Es así que se hace necesario reevaluar el sistema de evaluación de condensaciones y el resto de medidas de control de humedad para responder las preguntas ¿se producirá moho en una vivienda con PDA y normal uso?, ¿el sistema de evaluación de condensaciones es adecuado? ¿es suficiente el sistema de ventilación que se solicita para garantizar la reducción de humedad relativa interior? ¿Es suficiente la limitación de transmitancia térmica para evitar los puntos fríos críticos?

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La presente tesis busca responder esas preguntas partiendo por conocer al enemigo, el moho, su naturaleza, sistemas de predicción de formación existentes, normativa vigente, últimas investigaciones existentes, etc. Además, se evaluará la formación de moho en un caso de estudio tipo de manera teórica y experimental. Se evaluará la ocurrencia de condensación y formación de moho con método estático (planilla DITEC) y método dinámico (WUFI Pro/Bio/VTT).

La evaluación experimental se realizará en la cámara de clima controlado del laboratorio de CITEC de la Universidad del Bío, de esta forma se podrá conocer de manera experimental la ocurrencia de condensaciones y formación de moho.

La utilización de resultados de los softwares de simulación y de los experimentos de laboratorio permiten comparar y relacionar el comportamiento higrotérmico de soluciones técnicas (Muñoz y Bobadilla, 2012). De esta manera, con las conclusiones del análisis de los resultados teóricos y prácticos obtenidos se procederá a proponer los criterios de diseño de una envolvente higrotérmica libre de moho.

Esta investigación se basa en una solución de muro tipo PDA de tal manera que es relevante para las ciudades que cuentan con este plan, pero también para otras ciudades donde se implementan los mismos requerimientos a través de concursos o subsidios por parte del gobierno. Como se mencionó, también será relevante a nivel nacional, cuando estos requerimientos sean aplicables a toda vivienda nueva que se construya en el país.

1.2. HIPÓTESIS

Una vivienda construida con estándares PDA presenta formación de moho, los requerimientos de disminución de condensaciones no garantizan la no formación de moho.

A partir del análisis de los resultados de experimento en laboratorio, cálculos estáticos, simulaciones dinámicas y modelos de predicción además de la consideración del estado del arte, es posible establecer criterios de diseño de envolvente higrotérmica de viviendas orientada a evitar la formación de moho.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Analizar a través de una evaluación experimental la aptitud bio higrotérmica de una solución de envolvente tipo PDA, estableciendo posteriormente criterios de diseño de envolvente higrotérmica libre de moho.

1.3.2. Objetivos específicos

Objetivo 1: Revisar el estado del arte de la formación de moho en la vivienda.

Objetivo 2: Calcular de manera teórica la ocurrencia de condensaciones y formación de moho en un muro tipo PDA con 4 diferentes recubrimientos interiores.

Objetivo 3: Experimentar la ocurrencia de condensaciones y formación de moho en un muro tipo PDA con 4 diferentes recubrimientos interiores.

1.4. METODOLOGIA

La metodología de investigación se desarrolla en dos grandes partes: la primera es una investigación documental que incluye el estado del arte de la formación de moho en la vivienda y la segunda es experimental sobre un caso de estudio.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Específicamente se desarrollan las siguientes etapas:

Etapa 1: Estado del arte

Se realiza una revisión sistemática de las últimas investigaciones relacionadas con la formación de moho en la vivienda, no solo desde el punto de vista de la física de la construcción sino también desde el punto de vista de la naturaleza del microorganismo moho. Dentro de esto se detalla cómo afecta a la construcción y al ser humano, qué sistemas de cálculo higrotérmico y qué métodos de medición de formación de moho existen.

Las palabras claves utilizadas en la búsqueda fueron (en español, inglés y alemán):

Tabla N° 1: Palabras claves utilizadas en la búsqueda del estado del arte.

1	<i>Moho</i>	7	<i>Simulación higrotérmica</i>	13	<i>Efectos moho en vivienda</i>
2	<i>Condensación</i>	8	<i>Formación de moho</i>	14	<i>Transferencia de humedad</i>
3	<i>Humedad</i>	9	<i>Moho en la vivienda</i>	15	<i>Transferencia de vapor</i>
4	<i>Secado</i>	10	<i>Patologías en la vivienda</i>	16	<i>Modelos de crecimiento de moho</i>
5	<i>Esporas</i>	11	<i>Daños por humedad</i>	17	<i>Modelos predictivos de moho</i>
6	<i>Micelios</i>	12	<i>Efectos moho en salud</i>	18	<i>Condiciones ambientales transitorias</i>

Se revisa además las normativas relacionadas con los cálculos higrotérmicos y la formación de moho en Chile y en el extranjero, específicamente en Alemania.

Dentro de esta etapa se considera de manera adicional, la revisión de las investigaciones y temas desarrollados en la “Conferencia anual del centro para la humedad en los edificios, Gran Bretaña 2019” que tuvo lugar en noviembre de 2019 en el UCL Instituto de Diseño e Ingeniería Ambiental de la University College y el Building Research Establishment de Londres en Inglaterra.

La revisión de la normativa alemana y la asistencia a la conferencia mencionada se realizaron durante la pasantía de investigación en la Universidad de Ciencias Aplicadas, Hochschule Biberach en Alemania.

Etapa 2: Cálculo de condensación y formación de moho

Se calcula la ocurrencia de condensaciones y formación de moho sobre un caso de estudio, en base a los sistemas de cálculos higrotérmicos existentes:

1) Cálculo estático de condensaciones: se utiliza la herramienta que propone la División Técnica (DITEC) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). Esta herramienta se basa en el método Glaser (DIN 2018) de cálculo de condensaciones superficiales e intersticiales. Esta herramienta se basa en la normativa chilena NCh 1973 que a su vez se basa en la ISO 13788:2012.

El cálculo se realiza sobre el caso de estudio que considera un muro de tabiquería de madera, se realiza sobre la sección de la aislación y sobre la sección del puente térmico. Además, cada análisis se repite para cada uno de las 4 materiales de recubrimiento interior.

2) Cálculo dinámico de condensaciones: se utiliza para este cálculo higrotérmico numérico o dinámico el software WUFI Pro. Este software fue desarrollado por el Fraunhofer Institut en Alemania y permite predecir la condensación superficial, condensación intersticial, acumulación y secado del agua líquida en el tiempo. El cálculo también se realiza sobre el caso de estudio y secciones ya descritas. Este software considera, además de la acumulación de agua sobre o dentro de un elemento de construcción por condensación, las precipitaciones, ciclos del clima ambiental interior y exterior, propiedades de absorción, de conductividad y de resistencia al paso del vapor, logrando de esta manera un cálculo más real de la condensación y acumulación o secado de agua líquida en el tiempo.

3) Cálculo dinámico de formación de moho: se utiliza para este cálculo higrotérmico numérico o dinámico el software especial para la predicción de formación de moho WUFI Bio. Este software es similar a WUFI Pro pero se enfoca en la predicción de formación de moho. Esto permite enfocarse en el moho superficial,

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

evaluando, diferenciando y valorando las diferencias entre los análisis de las 4 distintos materiales de recubrimiento interior.

Etapa 3: Evaluación experimental de condensación y formación de moho

Se realiza una evaluación experimental en los laboratorios del Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC) de la Universidad del Bío Bío ubicado en la ciudad de Concepción (36°49'27"S, 79°00'49"O). Se desarrollan dos ensayos experimentales:

- 1) Ensayo de permeabilidad al vapor de agua: de cada uno de los 4 recubrimientos interiores utilizados en el caso de estudio. Este ensayo se realiza en base al procedimiento descrito en NCh 2457 Si bien las herramientas de cálculo ya cuentan con algunos valores de los materiales utilizados, se ensayó esta primera capa entendiendo que se requieren valores reales que permitan un cálculo preciso.
- 2) Ensayo de condensación de muro real en cámara con clima controlado: Se construye un muro de tabiquería con un valor de transmitancia térmica similar a una vivienda tipo PDA y estructurada en madera. Este muro se recubre con 4 diferentes materiales de terminación por su cara interior:
 - a) Papel mural común
 - b) Papel mural vinilizado
 - c) Esmalte al agua común
 - d) Esmalte al agua "antimoho"

El tiempo de ensayo es desde el 12 de agosto al 27 de septiembre de 2019 de manera continua con registros cada 30 minutos. La cámara de clima interior controlado permite mantener el clima interior similar a una vivienda con una alta humedad interior (clase higrotérmica 4 según ISO 13788) y con temperatura ambiental interior de alrededor de 20°C.

Las variables independientes utilizadas son las siguientes:

1. Tipo de muro y materiales que lo componen, que determinan un valor de transmitancia térmica
2. Humedad relativa interior
3. Temperatura ambiental interior

Los variables dependientes que se miden, en cada sección de cada recubrimiento se especifican a continuación:

1. Temperatura superficial interior
2. Contenido de agua de la primera capa
3. Registro de condensación superficial
4. Registro de formación de moho superficial

Además, se cuenta con los datos obtenidos de la estación meteorológica del laboratorio que entregan los siguientes registros:

1. Temperatura ambiental exterior
2. Humedad relativa exterior
3. Vientos predominantes

El registro de condensaciones se realiza con hojas metálicas que registran diferencias de corriente y resistencia al paso de esta diferenciando la presencia o no de agua líquida. El modelo de equipo utilizado para el registro de formación de condensación es el denominado "Leaf Wetness Sensor".

Etapa 4: Análisis de resultados y propuesta de criterios de envolvente higrotérmica libre moho

Se realiza un análisis de los resultados obtenidos en los cálculos teóricos y experimentales, estáticos y dinámicos, comparando y relacionando las variables dependientes e independientes. Se genera una matriz que relaciona las variables independientes y dependientes identificando sus diferencias y coincidencias.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Estos resultados y análisis se comparan con los resultados de las investigaciones existentes que se relacionen con las características del caso de estudio, tanto para las condensaciones y moho resultante como para las características y comportamiento de los materiales de recubrimiento interior estudiados.

En base a la información recolectada y ordenada se identifican las variables a modificar o a ajustar para generar un cálculo de condensaciones y formación de moho más preciso.

La propuesta de mejora para el diseño de una envolvente higrotérmica libre de moho se construye sobre los siguientes elementos:

1. Sobre la herramienta de cálculo estática actualmente utilizada.
2. Sobre los requerimientos del PDA en relación con el sistema de ventilación
3. Sobre el papel que juega el material de recubrimiento interior

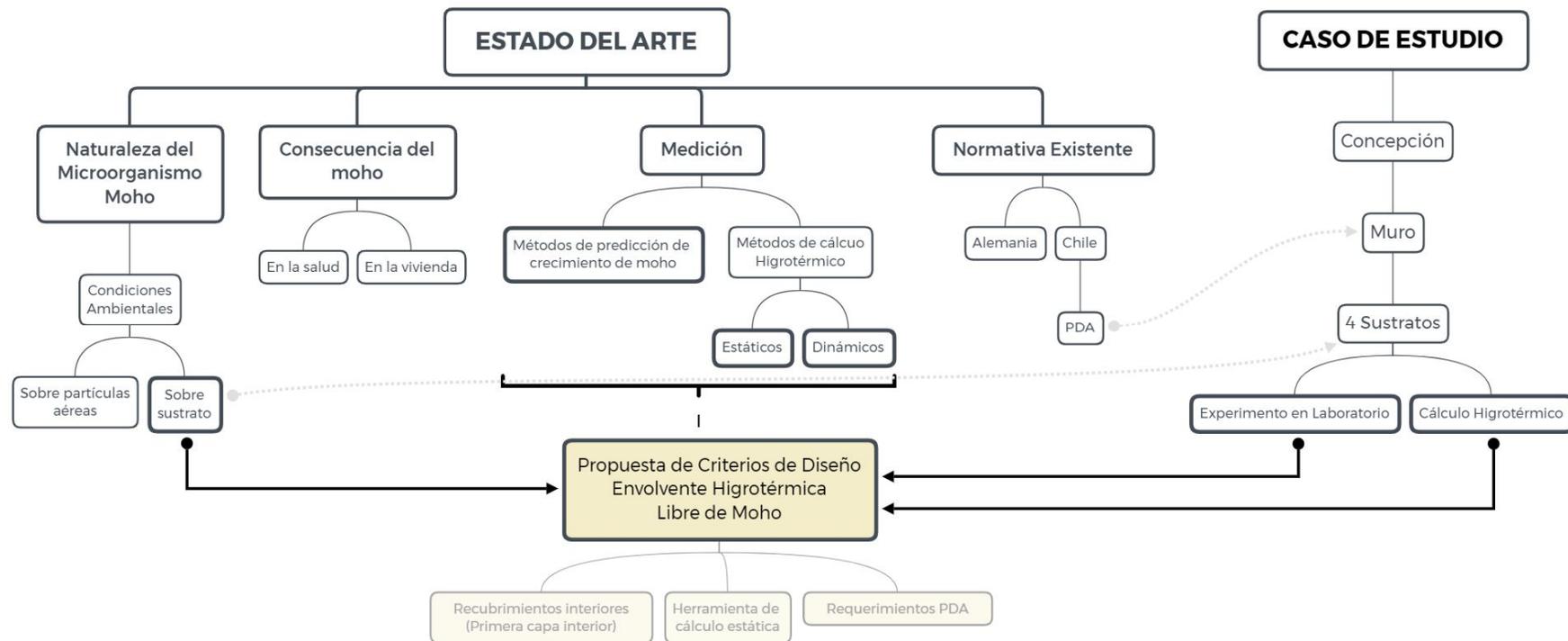


Figura N° 1: Mapa de ruta de la investigación

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

2.1. EL MOHO

El moho es un hongo microscópico, perteneciente a diferentes grupos biológicos y compuesto por muchas especies. Viven en las superficies de los materiales, utilizan nutrientes fácilmente asimilables para el crecimiento y producen esporas en el aire.

Los hongos del moho están muy extendidos en diferentes ambientes de la tierra y no existe un lugar natural donde el aire y los materiales estén libres de esporas. Cuando las condiciones son favorables, las esporas (también llamadas conidias) germinarán y se desarrollará un pequeño tubo germinal; si las condiciones favorables prevalecen, se formará una hifa. Una hifa es una estructura celular tubular que se extiende en la punta. Al ramificarse continuamente durante el crecimiento, las hifas forman un micelio. Eventualmente, se desarrollan estructuras especializadas (conidióforos) a partir de las hifas y de ellas; las esporas son producidas y dispersadas. En la siguiente figura se presenta una ilustración esquemática del ciclo de vida de un moho fúngico.

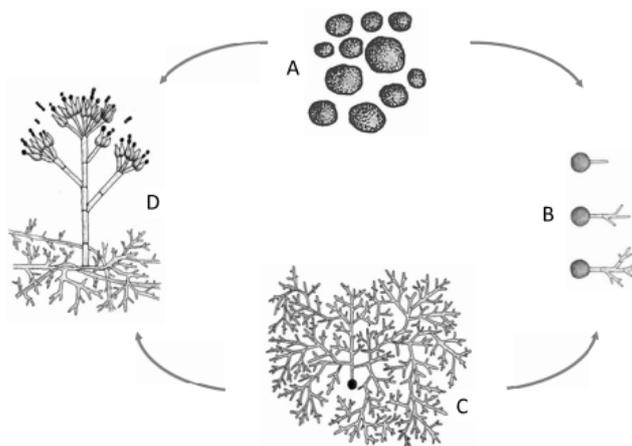


Figura N° 2: Ciclo de vida asexual del típico moho. Fuente: Johansson, 2014, ilustración de Agneta Olsson-Jonsson

A) Sobre la superficie de un material germina en un tubo germinal que se convierte en una hifa. B) Luego esta se extiende y ramifica en un micelio. C) Desde algunas de las hifas, se desarrollan conidióforos D) y de ellos se liberan masas de esporas (o conidias) en el aire.

El crecimiento del moho depende del agua y de los nutrientes adecuados. Por lo general, los requisitos nutricionales son mínimos y se alimentan de los componentes del material o por una contaminación menor de la superficie por polvo u otros depósitos (Becker, Puterman y Laks, 1986; Spitzner y De Anda, 2011).

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

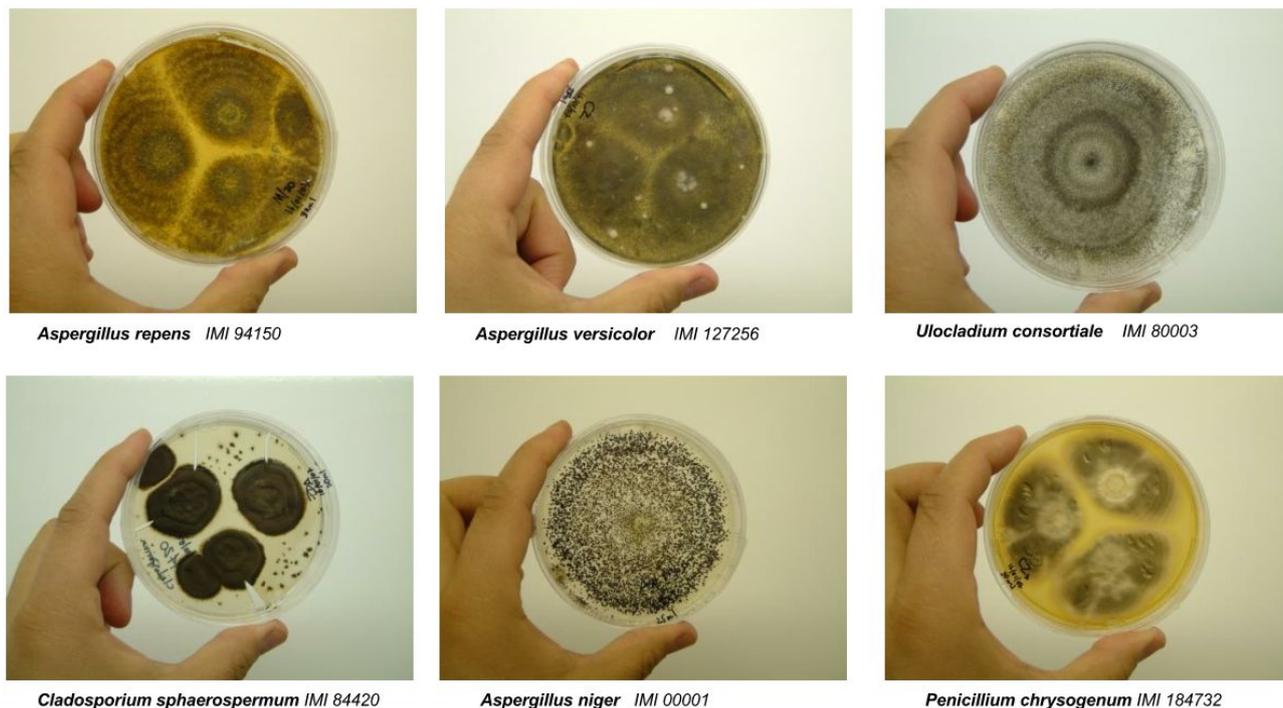


Figura N° 3: Ejemplos de tipos de moho inoculación in vitro, Fuente: Altamirano, 2016

El crecimiento prolongado de moho en los materiales de construcción puede ser visible a simple vista, sin embargo, existen especies que carecen del pigmento en sus hifas y esporas que pueden causar decoloración de las superficies en las que crecen. La producción de ciertos pigmentos para cada hongo es un rasgo específico de la especie, pero también puede depender de los nutrientes disponibles, o de la fase de crecimiento en la que se encuentra el hongo (Gadd, 1980; Eagen et al., 1997; Fleet et al., 2001).

Cuando crecen en un material, los hongos del moho producen una amplia gama de compuestos. Las diferentes especies producen diferentes compuestos, tales como compuestos orgánicos volátiles (COV), algunos de los cuales provocan mal olor, micotoxinas que puede afectar a la salud humana cuando se inhala y algunas partículas alérgicas. Las diferentes sustancias producidas dependen de los nutrientes existentes y de las condiciones de temperatura y humedad, y/o de las otras especies presentes (Sunesson et al., 1996; Nielsen et al., 2004).

Un gran número de especies de microhongos se encuentran comúnmente en ambientes húmedos de edificios. Varios estudios han tratado de determinar cuáles son los más comunes y sobre qué materiales de construcción se encuentran. Andersen et al. (2011) encontraron al menos 45 especies y Wessen (2006) encontró al menos 49 especies. Flannigan y Miller (2011) enumera por su parte 52 especies aisladas de los interiores de los edificios. No importa lo grande que sea el número exacto, una conclusión que se puede sacar de estos estudios es que hay una gran variedad de hongos de moho en los edificios.

Algunos de los hongos sólo crecen en ambientes muy específicos, mientras que otros pueden ser capaces de colonizar ambientes más diversos (Caddick, 1993). Si bien en la mayoría de los casos son varias las especies que aparecen juntas en un material de construcción (Andersen et al., 2011; Hyvärinen et al., 2002), en algunos casos sólo predomina una especie, como por ejemplo la especie *Penicillium corylophilum* encontrada como predominante en recintos habitables del sur de Suecia (Bok et al., 2009). Cuando existen varias especies juntas, puede haber interacción y comportamiento competitivo. Esto, a su vez, puede afectar varios aspectos del crecimiento del moho, como el crecimiento mismo o los metabolitos que son producidos.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA**La célula fúngica**

Si de cada 24 horas, 2,4 horas se caracterizan por una humedad que permite el desarrollo del moho u hongo se estaría hablando indirectamente de un TOW de 0,1 (concepto que se revisará en detalle en el capítulo siguiente). Para la colonia de hongos esto significa que los períodos intermitentes de desarrollo son seguidos por períodos más largos de humedad por debajo del nivel que soporta el crecimiento y como tal una extensión de las hifas fúngicas. Para la célula fúngica esto implica que el desarrollo se detiene a intervalos regulares y tiene que reanudarse dentro de la ventana de tiempo permitida, que puede ser un número de horas determinado.

Park (1982) desarrolló un estudio donde determinó que las interacciones dinámicas y complejas dentro del ápice de las hifas fúngicas pueden ser "congeladas" en el tiempo hasta 14 días y "simplemente" reanudar el crecimiento dentro de 30 minutos a 1 hora. Los hongos del suelo y de almacenamiento mostraron crecimiento no desde el margen sino desde compartimentos fúngicos residuales (posiblemente conidias o clamidiosporas) y alcanzaron el margen de la colonia después de largos períodos de retardo (5 a 50 horas). Con respecto al crecimiento de hongos en interiores que se ocupan de los cambios de humedad, esto daría un beneficio ecológico para los hongos que viven en las hojas por encima de los hongos normales y abundantes en interiores, como las especies de *Penicillium* y *Aspergillus*.

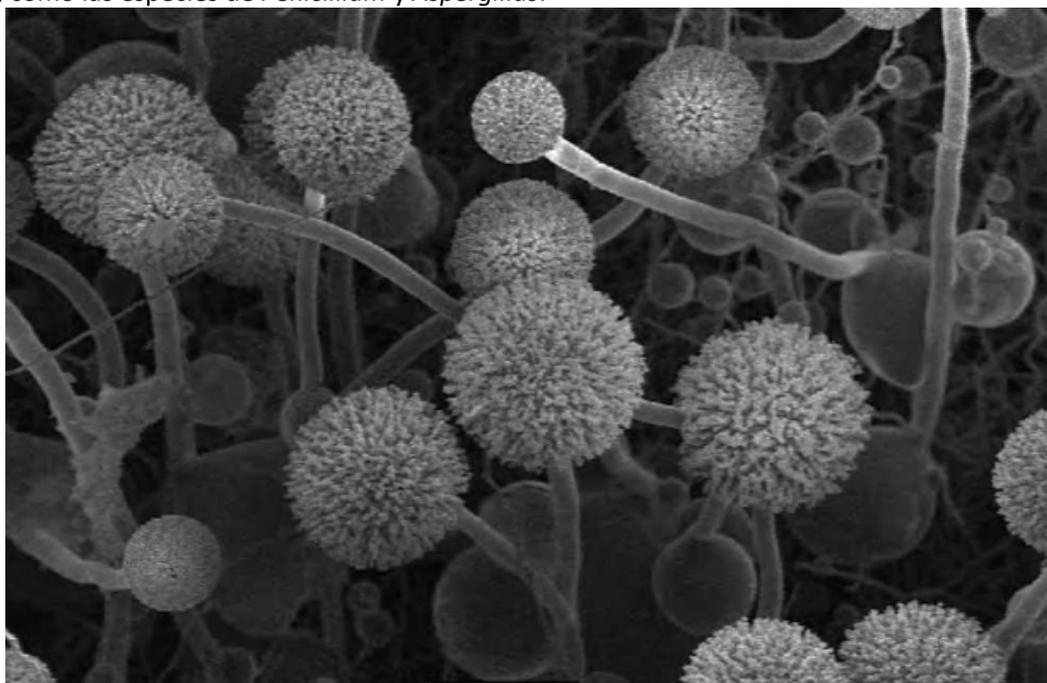


Figura N° 4: Formación de estructura de esporas en *Aspergillus niger*, imagen cryo SEM, escala de 110micras lo que significa que esta estructura es visible directamente. La diferencia en las medidas indica la diferencia de desarrollo de la conidia (espora) (Dijksterhuis, 2011)

Una colonia de hongos que crece en una pared de un baño se enfrentará a períodos de baja actividad de agua y aunque las hifas, aéreas por ejemplo, pueden cruzar milímetros o más cuando una fuente de agua está disponible en otro lugar, se requiere una actividad de agua mínima.

El hongo *Aspergillus oryzae* forma micelio aéreo abundante en un medio de grano de trigo y las mediciones indican un crecimiento de hasta 5 mm de longitud en condiciones muy húmedas (Rahardjo et al. 2002). La formación de micelio en el aire depende de la situación externa y las hifas aéreas se secarán si sus superficies

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

relativamente grandes están expuestas al aire seco. La investigación microscópica del material de construcción, sin embargo, indica que los hongos de interiores producen poco micelio aéreo pero abundantes estructuras esporuladoras (Adan and Samson 2011).

Algunas células crecen activamente en el sustrato o en el aire. Los conidioforos también crecen en el aire o se desarrollan en el sustrato para formar muchas células de supervivencia. La colonia de hongos consiste en diferentes tipos de células que son muy propensas a responder con sensibilidad a las condiciones variables que ocurren en el ambiente interior. El estudio de la biología de los hongos en estas condiciones artificiales es completamente nuevo y abriría una nueva área de investigación (van Laarhoven et al. 2015)

2.1.1. CONDICIONES AMBIENTALES

Para la formación de moho no se requiere necesariamente la presencia de agua líquida, como el agua de rocío, más bien se requiere la combinación de ciertas condiciones durante un tiempo determinado. La formación de moho puede ocurrir si, en al menos cinco días consecutivos, la humedad relativa en la superficie del componente tiene un valor mayor que 80% en al menos 12 horas al día. Con mayor humedad, estos periodos pueden ser más cortos (Spitzner y de Anda, 2011).

A continuación, se presentan algunas características de las condiciones en las que crece el moho entendiendo que a lo largo de esta tesis se revisarán y precisarán de todas maneras estas características y condiciones:

Suministro de nutrientes

En términos de suministro de nutrientes, los mohos suelen ser muy poco exigentes y a menudo es suficiente utilizar suciedad común en las superficies de los componentes para permitir el crecimiento del moho. La intensidad y probabilidad de crecimiento del moho depende significativamente del suministro de nutrientes y minerales.

Valor de PH

Los mohos prefieren un ambiente ligeramente ácido con un pH entre 4,5 y 6,5. Algunas especies en todo caso podrían crecer también fuera de este rango. Según sea el valor de pH, crecerá un determinado tipo de moho (Frazier W y Westhoff, 1988).

Temperatura

Los mohos generalmente crecen en un rango de temperatura de 10°C a 35°C. Según sea esta temperatura, así como sea el suministro de nutrientes y el valor de pH, puede producirse una selección del tipo de moho que crecerá.

Naturaleza de la superficie

La probabilidad de formación de moho sobre o dentro de una superficie de un elemento constructivo con frecuente ocurrencia de alta capacidad de absorción de humedad y capilaridad de la humedad del lado interior de la habitación también depende de la superficie o sustrato base. Las superficies absorbentes tienen un efecto amortiguador debido a su capacidad de absorción de humedad, sin embargo, contra los ataques frecuentes de humedad y obstaculización de la liberación de humedad así como del transporte de humedad son clasificados críticamente como superficies menos absorbentes.

Hay necesidad de más agua para la germinación que para la continuación del crecimiento, un estudio experimental de Møller et al. (2017) indica que los materiales de construcción secos (50% humedad relativa) pueden ser muy resistentes al crecimiento del moho si están expuestos a una alta humedad relativa (90%) sólo durante un período limitado, mientras que los materiales de construcción orgánicos son muy vulnerables cuando están expuestos al agua. Estas conclusiones apoyan bien las directrices existentes sobre evitar alta humedad o cualquier daño por agua durante el período de construcción, así como que los edificios deben

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

diseñarse de tal forma que la humedad relativa en las superficies interiores nunca supere el 75% de humedad relativa.

La discrepancia entre el clima interior y el microclima

Las humedades interiores transitorias ayudan a entender la diferencia entre el clima interior y el llamado microclima. Este microclima se define en base a las condiciones físicas de la superficie del material, es decir, en el entorno inmediato, a la escala y dimensiones del moho. Las condiciones de la superficie pueden diferir mucho de las condiciones ambientales, Adan et al. (2011) definen 4 efectos:

1. Diferencias de temperatura: La temperatura de la superficie puede diferir sustancialmente de la temperatura del aire interior. El efecto es más obvio en la envoltura del edificio, donde el transporte de calor a través de la construcción puede causar gradientes de temperatura sustanciales entre la superficie y el aire, así como a lo largo de la superficie. El puente térmico por ejemplo presenta un flujo singular de temperatura con temperaturas superficiales diferentes al corte común del elemento.

2. Transporte de vapor de agua en el aire: Cuando se emite vapor de agua (por ejemplo, durante los procesos de producción o las actividades domésticas), suele tener una temperatura superior a la del aire circundante. Esto induce una corriente ascendente de aire caliente y húmedo, creando un límite a lo largo de techos y paredes que humedece las superficies antes de mezclarlas con el aire interior y eliminarlas por ventilación. En términos de humedad relativa, las diferencias entre el aire ambiente y la superficie pueden aumentar fácilmente hasta el 50%. En ese caso, se produce condensación superficial, ya que la temperatura del aire suele estar por encima de la temperatura superficial, incluso en los muros interiores.

3. Retención de humedad en la superficie: La función de depósito del sustrato puede crear condiciones de superficie húmeda durante los períodos en que el aire ambiente vuelve a estar seco. Para los cambios de humedad interior diarios y de corta duración, una capa superficial del orden de unos pocos milímetros está activamente involucrada en los efectos del *buffering* (Van der Well y Adan 1999). Esto significa que el intercambio de agua con el barniz exterior, a menudo una pintura orgánica, juega un papel crucial. La característica del depósito puede llevar a una prolongación sustancial de las condiciones favorables de humedad en la superficie, como se mostrará en el siguiente párrafo.

4. La capacidad fúngica de influir en su entorno local: Las pruebas experimentales indican que el propio organismo vivo puede influir en el equilibrio hídrico en la interfaz sustrato-aire, ya sea de forma pasiva (por ejemplo, como resistencia a la difusión) o activa (por ejemplo, a través de exudados). Esta capacidad potencial para ajustar el entorno inmediato apenas se comprende y, en consecuencia, se suele ignorar su efecto. Los hongos se aprovechan contra el estrés de la sequía, tanto a través de mecanismos intracelulares como extracelulares:

- Acumulación intracelular de los llamados solutos compatibles. Casi todos los hongos poseen una (sobre)presión interna, llamada turgencia, una fuerza motriz para la extensión de la hifas.

La presión de turgencia real está relacionada con la entrada y salida de agua. Una salida neta de agua durante el secado o el aumento de la osmolaridad del medio ambiente causa deshidratación y reducción de la turgencia. La absorción y/o síntesis de los llamados solutos compatibles (por ejemplo, osmolitas orgánicas como el manitol y la trehalosa) permiten a la célula contrarrestar estos efectos. Por ejemplo, el hongo *Serpula lacrymans*, que es capaz de crecer sobre superficies inertes (por ejemplo, plásticos), acumula altos niveles de trehalosa.

- Secreción extracelular de agentes. Los hongos pueden afectar la disponibilidad de agua en su entorno inmediato. Read et al. (1983) mostraron que las hifas, los tubos germinales y las esporas hidratadas totalmente congeladas cultivadas o cultivadas en ambientes húmedos suelen estar recubiertas de gotas de agua o de filamentos de agua que ocultan las texturas de la superficie. De manera similar, (Adan & Samson, 1994)

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

observaron que la criofijación rápida de *P. Chrysogenum* en yeso y recubrimientos reveló estructuras coherentes de conidios, hifas y agua. Estas observaciones fueron inesperadas ya que no se agregó agua en la fase líquida antes de la incubación. Tales aglomerados de residuos acuosos y estructuras fúngicas pueden contener exudados hidrófilos. Un estudio de Van Wetter et al. (2000) indicó que los hongos pueden secretar polisacáridos que absorben eficazmente el agua y por lo tanto sirven para el crecimiento de hongos. Sin embargo, ninguno de estos mecanismos ha sido estudiado aún en el contexto de la dinámica del microclima.

2.1.1.1. EL AGUA

El crecimiento del moho depende del agua y de los nutrientes adecuados. Por lo general, los requerimientos nutricionales son mínimos y se satisfacen ya sea por los componentes del material o por una contaminación menor de la superficie por polvo u otros depósitos (Becker y Puterman 1987, Ginbergs et al. 1993).

Es importante entonces conocer el agua y los parámetros y conceptos que se ven involucrados, el agua suele ser el único factor limitante para el control de la formación de moho. Aunque el moho a menudo se relaciona con la condensación superficial, ósea una humedad relativa de 100%, la evidencia experimental muestra que la mayoría de los hongos germinan y crecen fácilmente en sustratos en equilibrio con las humedades relativas por debajo de la saturación. Prácticamente todos los mohos de interiores tienen condiciones óptimas para crecer en un rango de humedad relativa de entre 90 y 100%.

Pragmáticamente, existe consenso en la comunidad científica de que las superficies pueden mantenerse libres de crecimiento de moho si la humedad relativa del aire adyacente se mantiene por debajo del 80%. Un ejemplo de las investigaciones desarrolladas en esta línea y las posteriores regulaciones implementadas es la del Documento sobre Medios de Ventilación, Apartado F de The Building Regulations para Gran Bretaña (Altamirano, 2016). Para los fines de esta regulación, el criterio de humedad se cumplirá si la humedad relativa en una habitación no excede el 70% durante más de 2 horas en un período de 12 horas, y no excede el 90% durante más de 1 hora en un período de 12 horas durante la temporada de calefacción.

Así mismo se tiene que cuando la humedad relativa de la superficie es suficientemente alta, la temperatura de la superficie se convierte en un parámetro crucial para las tasas de crecimiento de los hongos (Adan and Samson 2011).

A continuación, se detallan los conceptos de humedad interior del ambiente y el estado de la humedad en los materiales.

Humedad interior

La norma NCh1973.Of2008 en su anexo A define cinco clases de humedad interior, estas dependen del tipo de edificio clasificado según su uso.

Tabla N° 2: Clases de higrometría interior. Fuente: NCh1973.Of2008, anexo A

clase de higrometría	tipo edificio
1	Zonas de almacenamiento
2	Oficinas, tiendas
3	Viviendas con baja ocupación
4	Viviendas con alta ocupación, pabellones deportivos, cocinas, cantinas, edificios calefaccionados con estufas sin chimenea de evacuación de gases de combustión
5	Edificios especiales (lavanderías, restaurantes, piscinas entre otros)

El gráfico que sigue permite determinar los límites de diferencia de presión y de exceso de humedad para cada clase de higrometría. Al realizar los cálculos se recomienda tomar el límite superior de cada clase.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

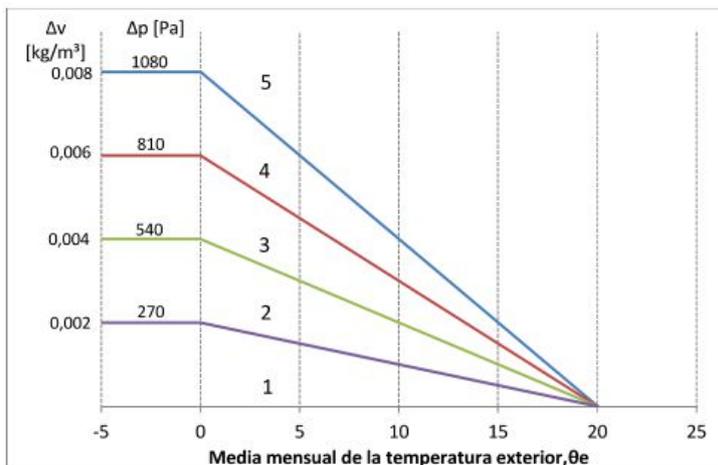


Figura N° 5: Variación de la humedad interior en función de as clases de higrometría y la temperatura exterior (NCh1973.Of2008 en su anexo A)

Como se revisará en el capítulo de NCh1973, la clase de higrometría que se considere es de vital importancia en los resultados de los cálculos teóricos de condensación.

El estado del agua en los materiales

El estado del agua en los materiales puede expresarse en muchos parámetros diferentes, como la actividad del agua, la presión osmótica, la fugacidad, el potencial hídrico y el contenido de agua. Este último se refiere a la cantidad de agua, y se refiere a una capacidad, mientras que los tres primeros se basan en el potencial químico, una cantidad termodinámica. La diferencia se puede entender más o menos a partir del siguiente ejemplo:

El agua tiende a pasar de un alto potencial de agua a un bajo potencial de agua, o de una alta actividad acuática a una baja actividad acuática, aunque el contenido de agua puede ser más bajo en el potencial o actividad más alta. Como la actividad del agua es una cantidad que se utiliza comúnmente en microbiología y ciencias de la alimentación, y el contenido de agua se aplica ampliamente en la física de la construcción y la ciencia de los materiales, tanto las cantidades como su relación con la humedad relativa se discutirán a continuación.

Actividad del agua

La actividad del agua se define en función del potencial químico, incluye información cualitativa sobre la disponibilidad de agua en un material, ya sea líquido o sólido. La actividad del agua oscila entre 0 y 1, siendo 1 el agua pura. Para una solución, la actividad del agua disminuye en función de los ingredientes disueltos. La cuantificación de la actividad del agua no se puede medir directamente por lo que se hace complicada su determinación. La actividad real del agua de una solución acuosa sólo puede medirse cuando la solución está en equilibrio con el aire que hay sobre ella. El valor de la humedad relativa del aire, expresado en relación, es igual a la actividad del agua, cuando se ha establecido un equilibrio entre la fase líquida y el aire y no se produce una transferencia neta de agua entre el aire y la solución (Figura 6). El mismo principio se aplica a la actividad acuosa de los sustratos sólidos, ya sean porosos o no porosos, la actividad del agua del material sólo se puede medir en caso de equilibrio entre el sustrato y el aire, es decir, midiendo la humedad relativa.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

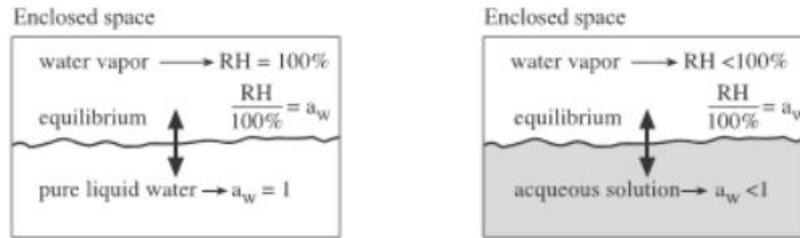


Figura N° 6: La actividad del agua de la solución es igual a la humedad relativa RH (expresada como proporción) sólo cuando se ha establecido un equilibrio y no se produce una transferencia neta de vapor de agua (Adan and Samson 2011). En términos matemáticos la actividad del agua de un material líquido o sólido es igual a la humedad relativa del aire del medio donde se encuentra, si la actividad de agua a_w , la igualdad se presenta de la siguiente manera:

$$RH (\%) = a_w \times 100$$

Contenido de agua

Generalmente, el contenido de agua de un material es una función de la humedad relativa bajo condiciones de equilibrio. Esta relación puede expresarse gráficamente en las llamadas isotermas de sorción, mostrando el contenido de agua de equilibrio en función de la HR para una temperatura específica. En el caso de los materiales porosos, la isoterma de absorción está estrechamente relacionada con las propiedades físicas y la geometría del sistema de poros. El contenido de agua de un material sólido puede expresarse como una fracción volumétrica (m^3/m^3), una fracción de masa (kg/kg) o una relación masa/volumen (kg/m^3).

El contenido de agua se debe a diferentes fenómenos, entre los que se encuentran la adsorción superficial (es decir, la formación de capas moleculares por adsorción física o quimisorción) y la condensación capilar. Esta última tiene lugar en las zonas de mayores humedades relativas, es decir, por encima del 35%. Su principio fue establecido por Thomson en 1871 y muestra que la condensación tiene lugar en un capilar a una humedad relativa inferior al 100%, dependiendo del tamaño de los poros. En poros más pequeños, la condensación capilar se produce a una menor humedad relativa, para poros más grandes se requieren mayores humedades relativas. Para la mayoría de los materiales, el contenido de agua aumenta con el aumento de la humedad relativa, pero en la región de alta humedad relativa, cercana a la saturación (es decir 100%), la forma de la curva se vuelve incierta.

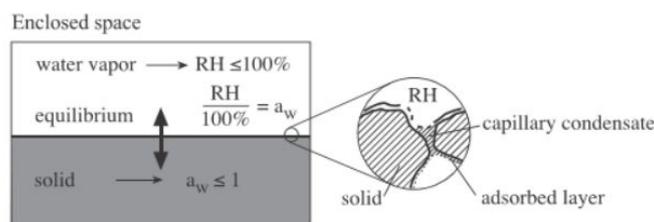


Figura N° 7: La actividad de agua de un sustrato, ya sea poroso o no poroso, de un material de construcción, sólo puede medirse en caso de equilibrio con el aire por encima de él. En ese caso, el contenido real de humedad del material no cambia (Adan and Samson 2011)

Un factor más complicado, sin embargo, se debe a la histéresis, tales efectos de histéresis pueden ser sustanciales para muchos materiales comunes, especialmente materiales orgánicos. Esto implica que una medición del contenido de agua, incluso cuando es 100% exacta, no puede ser transferida a una actividad de agua del material considerado o a una humedad relativa correspondiente.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

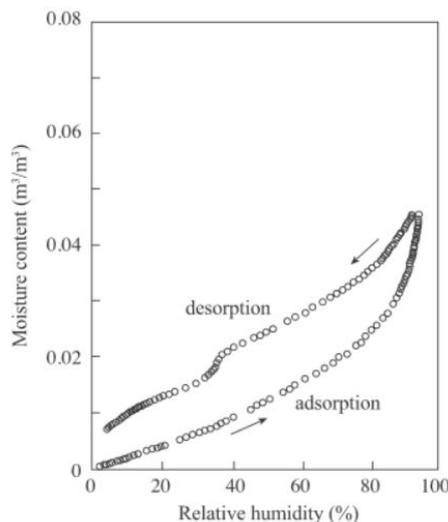


Figura N° 8: Un isoterma de absorción típico de un material a base de yeso, que muestra una rama de adsorción y desorción en un bucle de histéresis. (Adan and Samson 2011)

El contenido de humedad específico no es una función de valor único de la humedad relativa. Por consiguiente, el contenido de agua no es un parámetro apropiado para describir la susceptibilidad del material al moho (Adan and Samson 2011).

Condiciones transitorias: el desequilibrio entre el aire y el material

La relación entre la humedad relativa, la actividad del agua y el contenido de agua del sustrato está bien definida bajo condiciones de equilibrio en estado estacionario. En el caso de condiciones transitorias, esta relación se vuelve mucho más complicada.

Al humedecer o secar un material, el agua es transportada en la fase vapor y/o líquida, debido a una diferencia en los potenciales de accionamiento. Al revés, tan pronto como la humedad relativa del aire (expresada como una relación) y la actividad de agua del material no sean iguales, el transporte de agua tendrá lugar a través de la interfaz material-aire cuando la capa superficial no sea una barrera de vapor ideal. Este desequilibrio provoca un gradiente del potencial hídrico y del contenido de agua en el material, es decir, el contenido de agua y el potencial (o actividad) varían en función de la posición y el tiempo.

Generalmente, el secado y la humectación ocurren a diferentes velocidades. La absorción de agua líquida por un material como el yeso poroso suele ser muy rápida, mientras que el secado puede durar mucho tiempo (Adan 1995). Pueden encontrarse diferencias opuestas, por ejemplo, en algunos sistemas de revestimiento, donde la absorción puede ser mucho más lenta que el secado (Baukh et al. 2010).

Desde el punto de vista del moho, las condiciones en la interfaz material-aire, es decir, las condiciones reales de la superficie, juegan un papel fundamental. Estas condiciones se definen en función de la actividad de las aguas superficiales, que es igual a la humedad relativa superficial, suponiendo un equilibrio termodinámico inmediato. Además, la humedad relativa superficial está relacionada con el contenido de humedad a través de la curva de absorción.

En microbiología, se utilizan medios de cultivo que tienen una composición de nutrientes y una actividad de agua bien definidas, un ejemplo de esto último es el trabajo de Magan and Lacey (1984) y Ayerst (1969), sobre la germinación y el crecimiento de las especies *Cladosporium*, *Aspergillus* y *Penicillium*. Se destaca que en cualquier estudio de moho en medios de cultivo, la humedad relativa del aire (expresada en una fracción) por encima de la misma debe fijarse en el mismo valor de la actividad de agua del sustrato.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA**Respuesta fúngica a condiciones de humedad estables**

Los estudios de microbiología y micología se centran en condiciones de estabilidad de actividad de agua y temperaturas, se cultivan en laboratorio con condiciones estables, sin embargo, estas condiciones no reflejan las que realmente se producen en una construcción. Es por esto que los conceptos se confunden ya que en laboratorio la actividad de agua es comúnmente adoptada como disponibilidad de agua, directamente relacionada con la humedad relativa, lo cual solo se cumple bajo condiciones de equilibrio.

Como todos los procesos vivos, el crecimiento de hongos requiere la disponibilidad de agua. Generalmente, un ambiente saturado de 1,0 a_w , es tomado como el límite superior para el desarrollo de hongos.

Sin embargo, en los primeros trabajos de Scott (1957) ya se señaló que el crecimiento de hongos es imposible en agua pura, probablemente como consecuencia de la ausencia de nutrientes disueltos. Una actividad acuática mínima y óptima puede ser considerada como una de las principales características para el crecimiento de todo tipo de hongos. La actividad óptima de agua de la mayoría de los hongos se encuentra en un rango estrecho de 0,90 a 0,99, en su mayoría considerablemente mayor que 0,9 (Ayerst 1969).

Respuesta fúngica a condiciones fluctuantes de humedad y temperatura

El comportamiento de la humedad es complejo en los materiales de construcción, el estado microbiológico del material no puede concluirse de forma fiable sobre la base de la medición de humedad momentánea. Del mismo modo, las concentraciones de hongos cultivables en el material pueden ser engañosas, ya que la humedad ambiental y la temperatura condicionan considerablemente la viabilidad de los microorganismos. Para evaluar la respuesta del moho a las condiciones fluctuantes de humedad y temperatura, Pasanen et al. (2000) investigó el crecimiento y la viabilidad de los hongos en tres materiales de construcción en condiciones de humectación y secado. Los materiales fueron tomados de edificios en reparación y no se utilizó ninguna inoculación adicional de hongos, estos luego se sometieron a cuatro tratamientos de 4-8 semanas cada uno: absorción capilar de agua, secado al aire a una humedad relativa del 30%, condensación y finalmente secado al 50% de humedad relativa. El contenido de humedad, la humedad relativa de equilibrio y las concentraciones de hongos cultivables, actinomicetos y esporas totales se determinaron en los materiales a intervalos de 1 o 2 semanas.

Los resultados mostraron que cuando el agua era absorbida por la acción capilar de los materiales, el crecimiento de hongos comenzó rápidamente y fue abundante en los materiales a base de madera con contenido de humedad por encima del 20%. Tal valor límite no podría ser evaluado para la contaminación por moho en la placa de yeso debido al comportamiento complejo de la humedad entre el volumen de yeso y la cubierta de papel. La condensación bajo las diferentes condiciones de humedad relativa y temperatura sólo causó un crecimiento de mohos restringido en los materiales.

El estudio realizado por (Pasanen et al. 2000) demostró que la absorción capilar del agua en los materiales de construcción estudiados da lugar a una rápida contaminación por hongos, mientras que el crecimiento de hongos es significativamente más lento debido a la condensación de agua en la humedad y condiciones de temperatura. El secado rápido parece disminuir la viabilidad de las esporas fúngicas adaptadas a la alta humedad; sin embargo, algunos mohos, como las especies de *Penicillium*, son además tolerantes al estrés ambiental.

El concepto de tiempo de humedad Time Of Wetness (TOW)

El tiempo de humedad (TOW) corresponde a una aproximación de primer orden a los riesgos de crecimiento de moho (Adan 1994). Este tiempo de humectación representa en realidad la fracción de tiempo (que oscila entre 0 y 1) durante la cual la humedad relativa en la vecindad inmediata (o microambiente) del hongo está por encima de un nivel umbral, para lo cual se suele tomar el valor de humedad relativa del 80% (Figura 9).

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

Además de los efectos relacionados con el tiempo debidos a la producción intermitente de vapor de agua y al transporte de vapor en el aire, el sustrato en sí puede desempeñar un papel crucial en la definición de las condiciones de humedad de la superficie. En ese caso, los efectos de inercia se vuelven importantes.

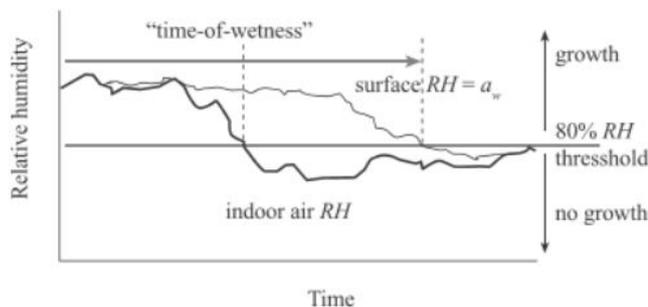


Figura N° 9: Presentación esquemática del TOW (Adan 1994)

La función de depósito de una capa fina de unos 10mm prolonga el tiempo de humedad en la superficie o TOW de menos de 0,01 a 0,33.

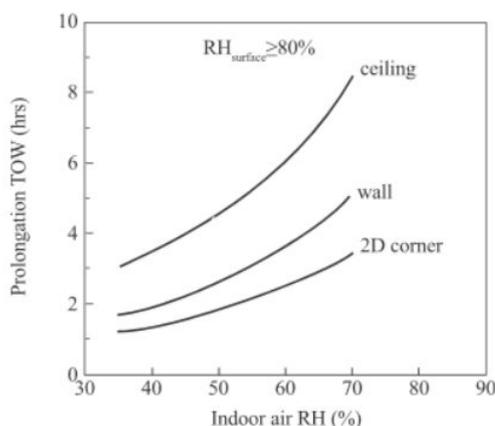


Figura N° 10: TOW de la superficie del yeso cartón como función de la humedad relativa ambiental después de 10 minutos de humedecimiento con una ducha (Adan 1994)

Respuesta fúngica a la dinámica del clima interior

Generalmente, el crecimiento de hongos bajo humedades cambiantes no puede explicarse por extrapolación del crecimiento bajo condiciones de humedad constante. El concepto TOW contribuye a revelar la respuesta al crecimiento del organismo.

Extensos experimentos de Adan (2011) con *Penicillium chrysogenum* en sustratos de yeso poroso y recubrimientos acrílicos indicaron una relación no lineal típica entre crecimiento de moho y TOW. Para ambos tipos de material, la Figura 11 muestra el crecimiento en función del TOW, incluyendo también el crecimiento previsto asumiendo una relación lineal.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

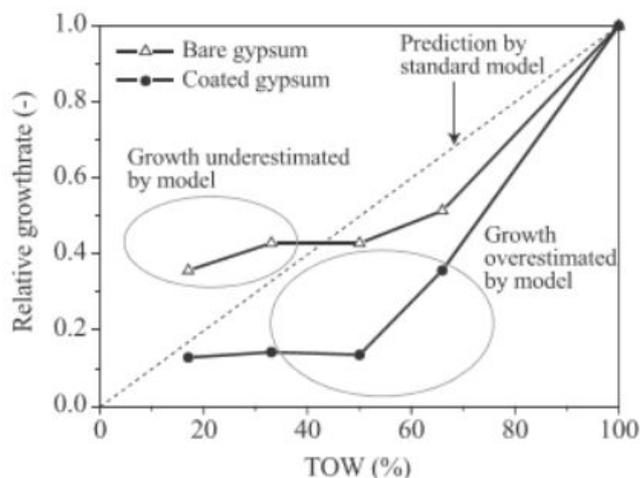


Figura N° 11: Tasa de crecimiento relativo de *Penicillium chrysogenum* sobre yeso cartón simple y recubierto en función del TOW. La línea puntueada representa la predicción de crecimiento asumiendo el estado estacionario de relación de agua (Adan 1994). Obviamente entre más bajo el valor de TOW, el modelo de predicción debe subestimar el crecimiento sobre el yeso, así como entre más alto el valor de TOW, estos deberían poder llevar a sobreestimar al yeso cartón recubierto (Adan et al. 2011)

Obviamente, en comparación con la situación de estado estacionario, las tasas de crecimiento pueden no ser proporcionalmente escaladas con la fracción de tiempo en el que las condiciones son favorables para el crecimiento.

En su estudio, Adan (2011) observó dos regímenes de crecimiento:

- 1) En el caso de valores intermedios y altos de TOW (con fluctuaciones rápidas, es decir, típicamente en el orden de horas) se produce una desaceleración del crecimiento en comparación con el mismo período de tiempo de humedades favorables en la situación de estado estacionario. Viitanen (1997) encontró efectos similares para una flora mixta de hongos, principalmente especies de *Aspergillus* y *Penicillium*.
- 2) A valores muy bajos de TOW se produce una aceleración del crecimiento en comparación con la situación de estado estacionario. La respuesta en esta región de bajo TOW es de gran interés, ya que demuestra que picos muy cortos de humedad, incluso por debajo de la saturación, pueden resultar en un crecimiento y que la reducción del TOW en ese rango tiene un efecto marcado en el desarrollo del hongo. En este caso, la predicción del crecimiento sobre la base de datos de estado estacionario puede dar lugar a una severa subestimación. Adan et al. (2011).

Ahora bien, cuando la dinámica se basa en periodos de humedad y secado, Huinink et al. (2011) identificaron concretamente la siguiente reacción de la biomasa (que permite el crecimiento del moho):

En periodos de humedad: La biomasa activa se multiplica y la biomasa pasiva se activa, ocurre una evolución de la biomasa.

En periodos de secado: La biomasa activa se hace pasiva y la biomasa pasiva se mantiene pasiva, ocurre un estancamiento en la evolución de la biomasa.

Como se puede observar, incluso en los periodos de secado no se presenta una disminución de la biomasa, como mínimo se estanca.

Para comprobar lo anterior, Huinink et al. (2011) crearon un modelo de prueba que demostró que el modelo estándar de variación de humedades relativas sólo funciona en caso de que el clima varíe lentamente (semanas). Las desviaciones del modelo estándar son predichas por el modelo de prueba desarrollado en caso

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

de fluctuaciones rápidas (horas y días). Estas desviaciones se han observado en varios experimentos. Esto implica que las predicciones de crecimiento de hongos basadas en datos climáticos en combinación con isopletras (tasas de crecimiento estables) sólo pueden justificarse para variaciones climáticas a largo plazo.

Se observó una discrepancia entre las predicciones de los modelos y los experimentos para los ciclos con períodos cortos de humedad (un pequeño tiempo de humedad). La característica interesante de este desacuerdo es que vuelve a señalar la importancia del proceso de activación.

Debe entenderse la influencia de la rehumectación en las diferentes etapas del ciclo de vida. La activación de la biomasa puede ocurrir a través de la germinación de esporas o reanudando el crecimiento de las hifas existentes. La importancia de ambos procesos de activación puede depender de la frecuencia del ciclo climático. Tal vez haya diferentes vías preferenciales de activación para diferentes frecuencias. En segundo lugar, el progreso en este ámbito sólo es posible con datos experimentales de carácter cuantitativo. La referencia a modelos simples, como se presenta en este capítulo, no tiene sentido mientras no haya casi ningún dato experimental para su validación (Huinink et al. 2011).

Validación de las condiciones críticas de humedad para el crecimiento del moho en materiales de construcción

Los materiales que se utilizan en condiciones húmedas pueden estar sujetos al crecimiento del moho. Sin embargo, todos los materiales no son igualmente susceptibles; para cada material específico, hay un nivel crítico de humedad para el crecimiento del moho. Si se supera esto, existe el riesgo de que se desarrollen hongos de moho en el material. Este nivel se puede determinar en pruebas de laboratorio aceleradas, a temperaturas constantes y humedad relativa favorable al crecimiento del moho, sobre estos experimentos es que se han desarrollado por ejemplo las curvas límites de construcción (LIMbau) del modelo de Isopletras que se revisará en el capítulo de métodos de predicción de crecimiento de moho.

Sin embargo, dentro de un edificio construido se espera que estos parámetros varíen de una parte de la construcción a otra, y rara vez son constantes ya que existen fluctuaciones en la temperatura y la humedad relativa debido a variaciones estacionales o a corto plazo. Johansson et al., (2013) realizaron un estudio donde se colocaron piezas de ensayo de los mismos materiales probados en un entorno de laboratorio en tres espacios de rastreo ventilados al aire libre y tres áticos ventilados al aire libre, donde la temperatura y la humedad relativa variaban, se estudió el crecimiento del moho en las piezas de ensayo se estudió durante 2,5 años.

Las curvas de crecimiento de moho específicas del material se produjeron en función de los niveles críticos de humedad, según se determina en experimentos de laboratorio a temperatura y humedad relativa constante. Cuando las condiciones reales de humedad relativa y temperatura excedieron estas curvas, hubo crecimiento de moho en las piezas de prueba si el tiempo era lo suficientemente largo. Aunque las condiciones en los estudios de laboratorio se simplifican y aceleran las investigaciones, los resultados si son válidos para predecir el crecimiento del moho dentro de una construcción de edificio (Johansson et al., 2013).

2.1.2. EL SUSTRATO

El sustrato es uno de los tres pilares que determinan la formación del moho. En este caso se estudian materiales de construcción que para que crezca el moho debe ser rico en proteínas y con ph alcalino, como se mencionó en el capítulo de las condiciones ambientales.

Si bien se pueden producir condensaciones superficiales e intersticiales, las investigaciones demuestran que la formación de moho se produce sobre la superficie y luego son los micelios los que pueden alcanzar mayor profundidad en la primera capa del material del corte constructivo analizado. Se ha dicho que las condiciones de humedad en la superficie son críticas para el desarrollo del crecimiento de hongos en un material, porque

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

los hongos (mohos) crecen en la superficie del sustrato y no pueden utilizar la humedad acumulada en el lado del material (Pasanen et al. 2000)

El párrafo anterior entonces da a entender que en teoría podría tener un corte constructivo con una primera capa totalmente seca y sin absorción capilar ni menos grietas o discontinuidades, y el resto de las capas húmedas y no se formaría moho. Esto es obviamente visto desde el interior y sin considerar los daños que se pudiesen producir en la estructura o en la estabilidad de los materiales húmedos que componen el corte constructivo.

La relación del sustrato y la humedad relativa es crucial para la determinación de formación de moho, diversos estudios se han focalizado en determinar el nivel de humedad crítica para diferentes materiales utilizados como primera capa (desde el interior) en la construcción. Johansson et al (2005) detallaron los niveles de humedad crítica para cada material de construcción, como ejemplo de estudios de laboratorios sobre el crecimiento de moho, como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla N° 3: Ejemplos de estudios de crecimiento de moho en laboratorio sobre varios materiales de construcción.

Material de construcción	Nivel crítico de humedad evaluado (Johansson et al 2005)	Referencia
Tablero de yeso cartón	80-85%	Pasanen, Juutinen et al. 1992; Nielsen, Nielsen et al. 2000; Pasanen, Kasanen et al. 2000; Ritschkoff, Viitanen et al. 2000; Doll and Burge 2001; Horner, Morey et al. 2001; Nielsen, Holm et al. 2004
Tableros de madera	75-80%	Pasanen, Juutinen et al. 1992; Wang 1992; Pasanen, Kasanen et al. 2000; Ritschkoff, Viitanen et al. 2000; Nielsen, Holm et al. 2004
Hormigón	90-95%	Nielsen, Nielsen et al. 2000; Ritschkoff, Viitanen et al. 2000; Viitanen 2004
Madera	75-80%	Hallenberg and Gilert 1988; Viitanen and Ritschkoff 1991; Pasanen, Juutinen et al. 1992; Nielsen 2002
Aislación térmica de lana mineral y otros materiales de aislación	90-95%	Chang, Foarde et al. 1995; Nielsen 2002; Klamer, Morsing et al. 2004; Viitanen 2004

En el capítulo de efectos del moho sobre materiales de construcción se detalla el efecto sobre tipos de materiales en específico. Los siguientes párrafos abordan temas de investigación existentes y sus principales resultados respecto al sustrato como material superficial y la relación con el ambiente donde se encuentra y la formación de moho.

Efectos del contenido de humedad en el crecimiento de moho sobre materiales porosos

La humedad relativa también controla la cantidad de agua presente en los materiales, Van Laarhoven et al. (2015) realizaron experimentos de crecimiento con la especie *Penicillium Rubens* en interiores sobre sustratos de yeso, para comprobar si el contenido de humedad influye en el crecimiento de materiales porosos. Los autores además desarrollaron un método de microscopía de video que por primera vez cuantificó el crecimiento de hifas en un material poroso. Se comprobó que a mayor contenido de humedad de los materiales, más temprana es la colonización e incluso mayores son las tasas de extensión de los hifas. Esto

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

significó un paso fundamental para desentrañar el efecto de la humedad relativa en el crecimiento de moho en interiores.

Difusión térmica del vapor de agua en materiales porosos

La investigación desarrollada por Janssen (2010) concluyó que no se puede observar una difusión térmica consistente ni significativa en materiales porosos. Esta conclusión también concuerda con los cálculos termodinámicos desarrollados, que confirman la existencia real de la difusión térmica pero que también indican una magnitud insignificante.

Puede afirmarse que la difusión térmica no tiene ninguna importancia para las aplicaciones científicas de la construcción, por lo que la presión de vapor es el único potencial de transporte significativo para la difusión de vapor de agua en materiales porosos Janssen (2010).

Adhesión Fúngica

Dentro del proceso de formación del moho sobre la superficie del sustrato, es importante que también la espora y posteriormente el moho se pueda adherir a la superficie. Después de adherirse en algún momento se envía una señal de actividad que permite el inicio del crecimiento.

Las etapas son las que se describen en el siguiente gráfico, el cual describe el proceso de adhesión considerando que el apego o sujeción pasiva inicial es reversible (impactación, quimiotaxis, atrapamiento y apego mediado por esporas), luego la sujeción activa, que resulta de una respuesta musgotrópica, conduce a la producción y liberación de adhesivo extracelular. La diferenciación de esporas y su germinación con tubos germinales envueltos por una vaina de hifas, luego comienza el desarrollo de apresorias y, finalmente, se penetra en el sustrato huésped.

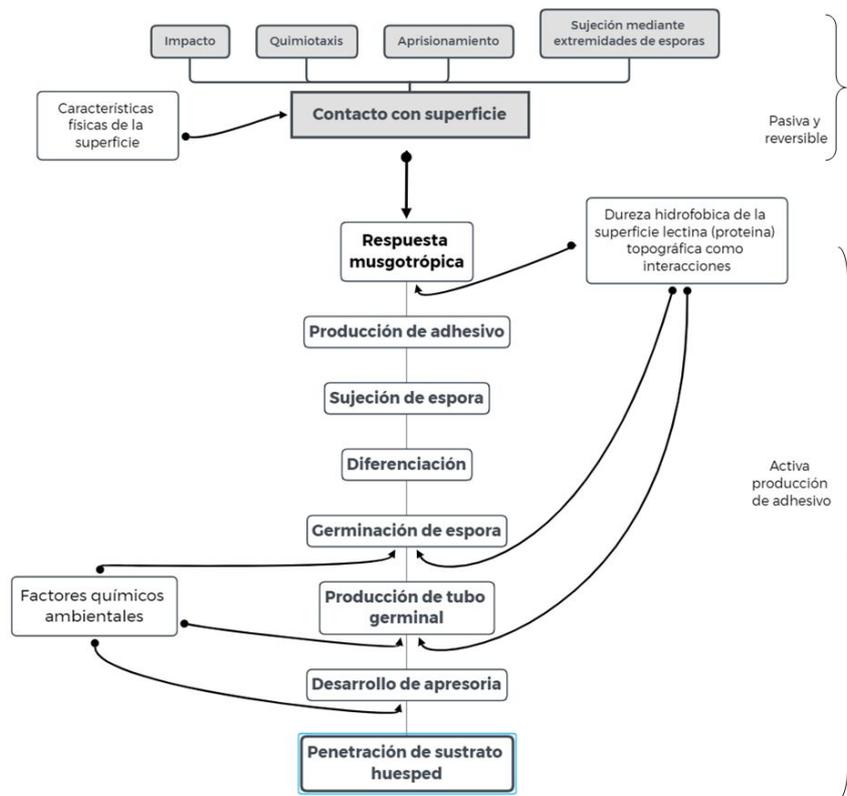


Figura N° 12: Secuencia de adhesión del moho en la superficie del sustrato para su posterior penetración. Elaboración propia a partir de Fungal adhesion, (Jones 1994)

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

Una apresoria es una célula especializada típica de muchos patógenos fúngicos de plantas que se utiliza para infectar a las plantas huéspedes. Es un órgano aplanado, con "presión" de hifas, desde el cual crece una pequeña clavija de infección que entra en el huésped, utilizando una presión de turgencia capaz de perforar incluso el Mylar (Howard et al. 1991).

Se destaca la importancia de la fijación de esporas en biotecnología, biodeterioro de materiales y patología vegetal y animal, en el caso de materiales de construcción sin duda que es un aspecto importante de conocer. El proceso de adhesión es un mecanismo característico de la mayoría de los hongos dentro de su ciclo de vida. Los hongos estudiados por Jones (1994) produjeron algunas formas de sujeción inicial con una respuesta musgotrópica, después de la cual los tubos de germinación producen envolturas de las hipas en contacto con la superficie, de esta manera muchos hongos podrán producir apresorias. Todas estas etapas mencionadas aseguran una mayor fijación de la espora sedimentada.

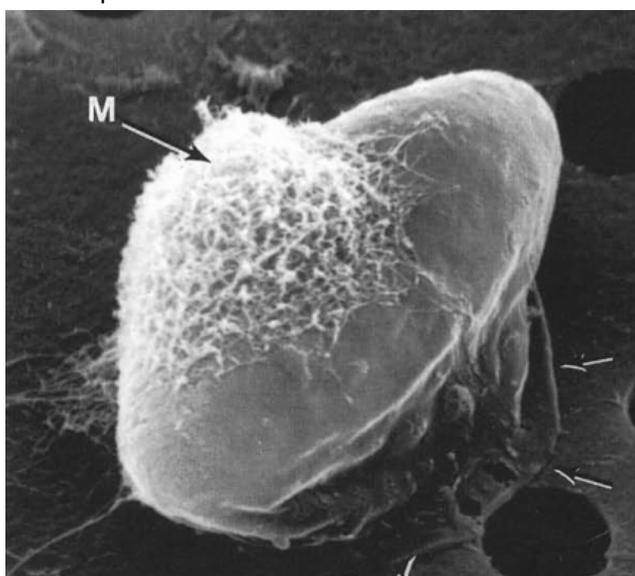


Figura N° 13: Ascospora (una espora dentro de una asca) con una vaina en forma de extremidades en forma de almohadilla (flechas negras) que se adhiere al sustrato y a la extremidad secundaria mucilaginosa (flecha M) (Jones 1994) Falta por desarrollar el mecanismo para transmitir una señal de que la espora ha hecho contacto con la superficie, resultando en la producción y liberación de adhesivo.

Impregnación de plata térmicamente reducida en materiales

La incorporación de ciertos compuestos a los materiales de construcción podría disminuir la probabilidad de formación de moho. (Chen et al. 2017) realizaron un estudio que evaluó la efectividad antifúngica a largo plazo de 3 tipos de materiales de construcción interiores: placa de yeso, placa de cemento y madera contrachapada de coníferas, los cuales se impregnaron con nanopartículas de plata de reducción térmica soportadas por dióxido de titanio (AgNPs/TiO₂) y se evaluaron durante 4 semanas bajo 95% de humedad relativa.

El crecimiento de moho se inhibió casi completamente durante 28 días con un nivel de carga de plata de bajo 0,5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. Además, los dióxidos de titanio mostraron una mayor actividad antifúngica en placa de yeso y placa de cemento que en la placa de madera contrachapada. La temperatura de reducción térmica, la carga de plata, y el nivel del catión Ag⁰ fueron los principales factores que influyeron en la actividad antifúngica, pudiendo ser la temperatura de reducción térmica la más significativa. (Chen et al. 2017)

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

2.1.3. LAS PARTÍCULAS AÉREAS

Una colonia de hongos que crece en una pared en un baño se enfrentará a períodos de actividad de agua baja. Las hifas aéreas pueden cruzar un par de milímetros cuando una fuente de agua está disponible en otro lugar, pero también necesitan una actividad mínima del agua para formarse. El hongo *Aspergillus oryzae* forma abundante micelio aéreo en un medio de grano de trigo y las medidas indican un crecimiento de hasta 5 mm de longitud en condiciones muy húmedas. La formación de micelio aéreo depende de la situación externa y las hifas aéreas se secarán si sus superficies relativamente grandes están expuestas al aire seco. La investigación microscópica del material de construcción, sin embargo, indica que los hongos interiores producen poco micelio aéreo pero abundantes estructuras esporulantes.

Algunas células crecen activamente en el sustrato o en el aire. Los conidióforos también crecen en el aire o se desarrollan en el sustrato para formar muchas células de supervivencia. La colonia de hongos consiste en diferentes tipos de células que son muy propensas a responder con diferente sensibilidad a las condiciones variables que se producen en el ambiente interior. El estudio de la ecología de los hongos en estas condiciones artificiales es completamente novedoso y abriría una nueva área de investigación (Weigl et al. 2016).

La presente investigación no ahondará más en este desarrollo aéreo y se concentrará principalmente en el sustrato o recubrimiento interior del muro.

2.2. CONSECUENCIA DEL MOHO EN LA SALUD

En los últimos 30 años, ha habido un cambio aparente en el porcentaje de asmáticos sensibles al moho. Sobre la base de los datos adquiridos a finales de la década de 1980, el riesgo máximo atribuible parecía ser el 20% del total de asmáticos (Dekker et al. 1991). Estudios europeos indican que la sensibilización al moho es un factor de riesgo significativo para el asma y para el ingreso hospitalario para el asma (Zureik et al. 2002, O'Driscoll et al. 2005). Un análisis reciente de la alergia a los hongos sugiere que estos porcentajes están aumentando aún más (Simon-Nobbe et al. 2008).

Un ejemplo de los efectos del moho en la salud es el de tipo *Aspergillus* que provoca la aspergilosis, que es una infección pulmonar aguda. El *Aspergillus* puede causar enfermedad de tres maneras: una reacción alérgica en los asmáticos, una colonización en el tejido pulmonar cicatrizado y una infección invasiva con neumonía, que puede afectar el corazón, los pulmones, el cerebro y los riñones.

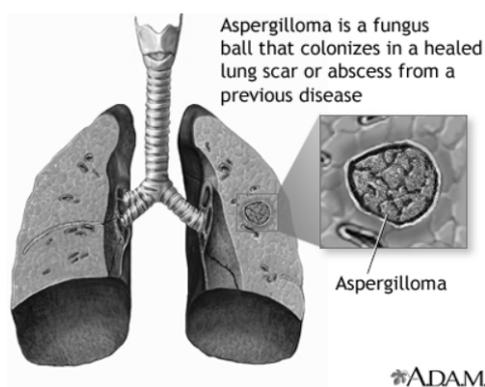


Figura N° 14: Colonización en tejido pulmonar de *Aspergillus* (Web Animated Dissection of Anatomy for Medicine A.D.A.M.)

Además de este tipo de enfermedad pulmonar, el moho en el aire y las posibles micotoxinas pueden generar diversos otros problemas a la salud. La calidad microbiológica del aire del ambiente interior es importante de

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

estudiar ya que, de esta calidad, determinada por los sistemas de ventilación asociados, dependerá la propagación o crecimiento de moho y su efecto sobre la salud.

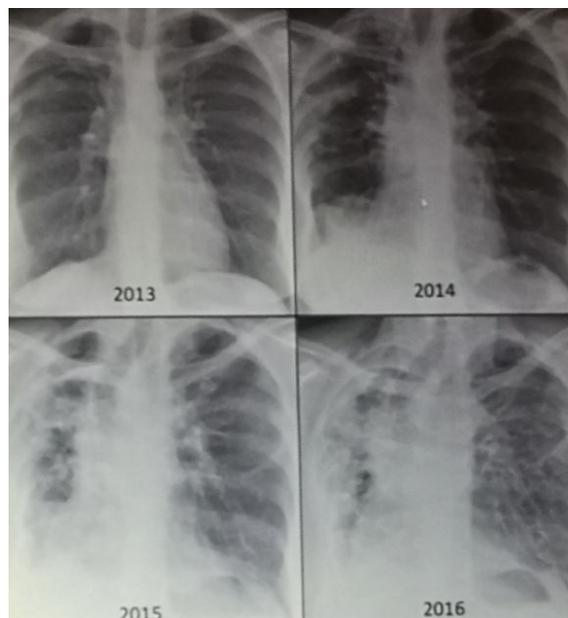


Figura N° 15: Radiografía del desarrollo de Aspergilosis Broncopulmonar Alérgica (ABPA) en un paciente durante 4 años.
(Graham Atherton, 2019)

Calidad microbiológica del aire con diferentes sistemas de ventilación

Szymczak et al. (2018) realizaron un estudio que comparó de manera directa diferentes sistemas de ventilación en ambientes microbiológicos en 15 edificios de oficinas. Las concentraciones de bacterias y hongos se pueden medir en unidades de formación de colonias o cfu (colony forming unit) por metro cúbico de aire.

Los resultados mostraron que las concentraciones de bacterias y hongos en los edificios de oficinas ventilados de forma natural se situaban entre 70 y 1.600 cfu/m³, mientras que en las oficinas equipadas con sistemas de aire acondicionado y ventilación mecánica las concentraciones eran inferiores, es decir, entre 10 y 530 cfu/m³ y 20 y 410 cfu/m³, respectivamente. El análisis de la distribución por tamaños reveló que los microorganismos estaban presentes en el aire principalmente como células individuales (1,1-3,3 μm) y como grandes agregados (4,7->7 μm). Si estas partículas se depositan en el tracto respiratorio humano, pueden ser responsables de irritaciones de la nariz y los ojos, reacciones asmáticas e inflamaciones alérgicas.

Las especies bacterianas más prevalentes en interiores fueron los cocos Gram positivos (principalmente de los géneros *Staphylococcus* y *Micrococcus/Kocuria*) y las varillas Gram positivas que forman esporas (del género *Bacillus*). Las especies de hongos más comunes encontradas fueron las de los géneros *Penicillium*, *Aspergillus* y *Cladosporium*.

Los investigadores pudieron concluir que el funcionamiento eficaz y el mantenimiento regular de los sistemas de ventilación mecánica o de aire acondicionado garantizan una mejor calidad higiénica en los edificios de oficinas que la ventilación natural/gravitatoria (Szymczak et al. 2018). La falta de mantenimiento o limpieza podría generar el síndrome del edificio enfermo pudiendo producir más problemas relacionados con moho, convirtiéndose los componentes, filtros y ductos en ambiente ideal para cultivos de moho y otros microorganismos.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA**Directrices de la OMS para la calidad del aire interior respecto a la humedad y moho**

Basándose en la revisión sistemática de la evidencia científica, el grupo de trabajo de la OMS concluyó en octubre de 2007 en Bonn que hay evidencia epidemiológica suficiente de estudios realizados en diferentes países y condiciones climáticas que muestran que los ocupantes de edificios afectados por la humedad o el moho, tanto en los hogares como en los edificios públicos, están en mayor riesgo de experimentar síntomas respiratorios, infecciones respiratorias y exacerbaciones del asma (OMS, 2008). Evidencia no exhaustiva sugiere un mayor riesgo de desarrollar rinitis alérgica y asma. Aunque no se dispone de muchos estudios de intervención bien documentados, sus resultados muestran que la remediación de los problemas de humedad conduce a una reducción de los resultados adversos para la salud.

Los grupos de población como los individuos atópicos y alérgicos son particularmente susceptibles a la exposición a agentes biológicos y químicos en ambientes interiores húmedos, pero también se han demostrado ampliamente los efectos adversos para la salud en poblaciones no atópicas (por ejemplo, Rönmark et al. 1999). La mayor prevalencia de asma y alergias en muchos países aumenta el número de personas susceptibles a los efectos de la humedad y el moho en los edificios.

Micotoxinas en materiales de construcción

La producción de micotoxinas en los materiales comienza a ocurrir a un elevado a_w (mayor a 0,9 en la superficie del material), pero la producción significativa recién se produce con valores por encima de a_w 0,95. Sin embargo, la exposición es mayor a partir de materiales secos y biomasa en descomposición. En el peor de los casos se trata de daños producidos por el agua, donde se formarán grandes cantidades de biomasa y micotoxinas seguidas de desecación de la biomasa, provocando la aerosolización de numerosas esporas y fragmentos de micropartículas que se depositarán por todo el edificio y las superficies de su envolvente.

En comparación con otras especies de interior, *S. Chartarum* produce cantidades muy altas de metabolitos secundarios cuando crece en edificios. Asimismo, *Chaetomium globosum* también debe tenerse en cuenta, especialmente cuando la superficie está seca, ya que las micropartículas contendrán cantidades considerables de micotoxinas de *Chaetoglobosina*. Las penicilinas investigadas hasta ahora producen muy pocas y bajas cantidades de metabolitos secundarios y micotoxinas cuando crecen en materiales de construcción. Lo mismo ocurre con el Aspergilli, excepto con el *A. Versicolor*, que puede producir hasta el 1% de su biomasa en forma de Esterigmatocistinas, pero la exposición a las Esterigmatocistinas debe producirse a través de micropartículas, ya que casi no se forman esporas en el material de interior.

Las micotoxinas son sustancias que pueden causar problemas respiratorios y no respiratorios, la forma en que el moho y sus micotoxinas provocan enfermedades se puede categorizar en 3: reacciones sensitivas como alergias, reacciones bioquímicas como alteraciones fisiológicas e infecciones micóticas.

Trabajar con micotoxinas en edificios es una tarea multidisciplinar, que requiere conocimientos de quimiotaxonomía, metabolismo fúngico y vías biosintéticas, además de la propia identificación fúngica. Además, se necesitan conocimientos sobre la fisiología de los hongos y el crecimiento en los materiales de construcción, la química analítica avanzada, la física de partículas, la biología celular y la toxicología (Fog Nielsen et al. 2011).

Tipos de micotoxinas

Algunos de los diferentes tipos de micotoxinas son:

- Las Aflatoxinas (producidas por los Aspergillus) - incluyen la Aflatoxina B1, B2, G1, G2, M1 y M2
- La Ocratoxina - incluye las Ocratoxinas A, B y C
- Los Tricotecenos (producidos por Stachybotrys) - incluye Satratoxin-H, Vomitoxina y las micotoxinas T-2
- Las Fumonisinias - incluye las Fumonisinias B1 y B2
- Zearalenona

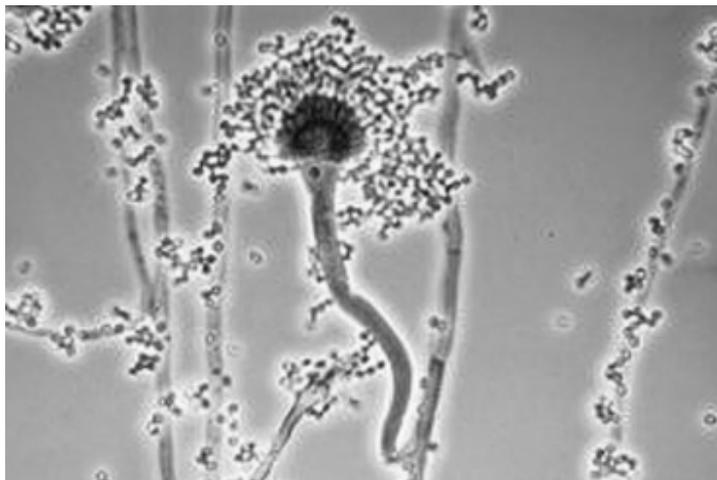
CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

Figura N° 16: *Aspergillus* es uno de los principales grupos de hongos responsables de la producción de micotoxinas nocivas para plantas y animales (<https://es.wikipedia.org/wiki/Micotoxina>)

Las micotoxinas no están en realidad vivas como las esporas del moho. Así que cuando hablamos de "matar micotoxinas" lo que realmente significa es descomponer las micotoxinas y su toxicidad para que ya no sean peligrosas para los seres humanos.

Se necesita una temperatura de 260 °C durante media hora o de 482 °C durante 10 minutos para destruir las micotoxinas tricotecenos. También con lejía con un 5% de hipoclorito de sodio se puede descomponer las micotoxinas tricotecenos, así como otras micotoxinas como la Aflatoxina.

El ozono se supone que mata a la mayoría o todas las micotoxinas sin embargo, el nivel de ozono que se necesita para matar a las micotoxinas no es seguro para los seres humanos. Así que si se usa un generador de ozono no debe haber nadie en el lugar. Los filtros de aire HEPA no son eficaces en la eliminación de las micotoxinas, sin embargo, los filtros de carbón activo pueden eliminar las micotoxinas del aire.

Finalmente, las micotoxinas se descomponen y pierden su toxicidad después de algún tiempo. Aunque algunos tipos de micotoxinas pueden tardar varios años como por ejemplo las micotoxinas tricotecenos se encuentran entre las más resistentes.

Al igual que las esporas del moho, las micotoxinas son demasiado pequeñas para que podamos verlas a simple vista. Las micotoxinas son tan pequeñas como 0,1 micras. Las esporas del moho son entre 1 y 20 micras. El cabello humano, para la comparación, es de aproximadamente 100 micras de espesor.

Las micotoxinas en el cuerpo humano

Cuando las personas están alrededor del moho tóxico normalmente están expuestas a las micotoxinas del aire por inhalación. Estas micotoxinas terminan en los pulmones y causan problemas respiratorios y otros síntomas graves.

Las micotoxinas en el aire también pueden entrar a través de los ojos de una persona. Las micotoxinas tricotecenos pueden ser absorbidas también por la piel.

Otra forma de que las micotoxinas entren en el cuerpo de una persona es cuando la persona come alimentos con micotoxinas en ellos. Esto puede suceder si el moho tóxico ha crecido en los cultivos.

Muchas micotoxinas, por ejemplo los tricotecenos, siguen siendo tóxicas incluso después de su cocción. Esta es una razón por la que las micotoxinas son un gran problema en la agricultura. Un agente aglutinante se utiliza en los cultivos como los cereales después de la cosecha para eliminar las micotoxinas.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

Durante el año 2004 en Kenia, 125 personas murieron después de comer maíz contaminado con las micotoxinas aflatoxina. También ha habido muchos casos de animales domésticos que mueren por comer alimento para mascotas con micotoxinas en él.



Figura N° 17: Ejemplo de micotoxicosis: ergotismo gangrenoso (<https://es.wikipedia.org/wiki/Micotoxina>)

2.3. CONSECUENCIA DEL MOHO EN LA CONSTRUCCIÓN

La microbiota de ambientes interiores contiene alrededor de 100-150 especies y esto es sólo una fracción de las más de 100.000 especies de hongos descritos (Samson et al. 2010, Miller 2011).

Un estudio desarrollado en la ciudad de München Alemania determinó esta cantidad de especies y las identificó como se muestra en los siguientes cuadros:

Tabla N° 4: Especies de mohos comunes en ambientes interiores (Adan et al.,2011)

<i>Absidia corymbifera</i>	<i>Eurotium amstelodami</i>	<i>Penicillium rugulosum</i>
<i>Acremonium murorum</i>	<i>Eurotium chevaleri</i>	<i>Penicillium simplicissimum</i>
<i>Acremonium strictum</i>	<i>Eurotium herbariorum</i>	<i>Penicillium spinulosum</i>
<i>Alternaria tenuissima</i>	<i>Eurotium rubrum</i>	<i>Penicillium variabile</i>
<i>Aspergillus calidoustus</i>	<i>Exophiala dermatitidis</i>	<i>Phialophora fastigiata</i>
<i>Aspergillus candidus</i>	<i>Fusarium culmorum</i>	<i>Phialophora verrucosa</i>
<i>Aspergillus clavatus</i>	<i>Fusarium solani</i>	<i>Phoma glomerata</i>
<i>Aspergillus flavus</i>	<i>Fusarium verticillioides</i>	<i>Phoma macrostoma</i>
<i>Aspergillus fumigatus</i>	<i>Geomyces pannorum</i>	<i>Pyronema domesticum</i>
<i>Aspergillus niger</i>	<i>Geotrichum candidum</i>	<i>Rhizopus stolonifer</i>
<i>Aspergillus penicillioides</i>	<i>Mucor circinnolides</i>	<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>
<i>Aspergillus restrictus</i>	<i>Mucor plumbeus</i>	<i>Schizophyllum commune</i>
<i>Aspergillus sydowii</i>	<i>Mucor racemosus</i>	<i>Scopulariopsis brevicaulis</i>
<i>Aspergillus terreus</i>	<i>Oidiodendron griseum</i>	<i>Scopulariopsis candida</i>
<i>Aspergillus versicolor</i>	<i>Oidiodendron rhodogenum</i>	<i>Scopulariopsis fusca</i>
<i>Aspergillus westerdijkiae</i>	<i>Paecilomyces lilacinus</i>	<i>Serpula lacrymans</i>
<i>Aureobasidium pullulans</i>	<i>Paecilomyces variotii</i>	<i>Sistotrema brinkmannii</i>
<i>Botrytis cinerea</i>	<i>Penicillium brevicompactum</i>	<i>Sporobolomyces roseus</i>
<i>Candida peltata</i>	<i>Penicillium chrysogenum</i>	<i>Stachybotrys chartarum</i>
<i>Chaetomium aureum</i>	<i>Penicillium citreonigrum</i>	<i>Stachybotrys (Memnoniella)</i>
<i>Chaetomium globosum</i>	<i>Penicillium citrinum</i>	<i>echinata</i>
<i>Chrysonillia sitophila</i>	<i>Penicillium commune</i>	<i>Syncephalastrum racemosum</i>
<i>Cladosporium cladosporioides</i>	<i>Penicillium corylophilum</i>	<i>Trichoderma harzianum</i>
<i>Cladosporium herbarum</i>	<i>Penicillium crustosum</i>	<i>Trichoderma longibrachiatum</i>
<i>Cladosporium macrocarpum</i>	<i>Penicillium decumbens</i>	<i>Trichoderma viride</i>
<i>Cladosporium sphaerospermum</i>	<i>Penicillium expansum</i>	<i>Tritirachium oryzae</i>
<i>Cryptococcus laurentii</i>	<i>Penicillium funiculosum</i>	<i>Ulocladium alternariae</i>
<i>Curvularia lunata</i>	<i>Penicillium glabrum</i>	<i>Ulocladium atrum</i>
<i>Emericella nidulans</i>	<i>Penicillium olsonii</i>	<i>Ulocladium chartarum</i>
<i>Epicoccum nigrum</i>	<i>Penicillium palitans</i>	<i>Wallemia sebi</i>

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

Tabla N° 5: Especies de mohos comunes que se repiten (izquierda) y su nombre antiguo incorrecto (derecha) (Adan et al.,2011)

<i>Epicoccum nigrum</i>	<i>Epicoccum purpurascens</i>
<i>Aspergillus calidoustus</i>	<i>Aspergillus ustus</i>
<i>Aspergillus westerdijkiae</i>	<i>Aspergillus ochraceus</i>
<i>Penicillium glabrum</i>	<i>Penicillium frequentans</i>
<i>Penicillium glaucum</i>	Refer to various <i>Penicillium</i> species
<i>Penicillium chrysogenum</i>	<i>Penicillium notatum</i>
<i>Penicillium verrucosum</i>	Refer to species of subgenus <i>Penicillium</i>
<i>Verticillium lecanii</i>	<i>Lecanicillium lecanii</i>

En la revisión de la normativa alemana existente, específicamente DIN 4108-8:2010, se puede ver una tabla que relaciona la especie con la fuente y/o material donde normalmente se puede encontrar.

2.3.1. Comportamiento de materiales frente a la humedad

La humedad en los materiales de una vivienda, sea esta producto de condensación, penetración de lluvias, desde el suelo, fugas u otras razones, produce numerosos efectos perniciosos en muchos materiales de construcción, especialmente aquellos que pueden estar sometidos a la interperie a aguas apozadas o a alta humedad permanente.

Los efectos pueden ser de variada índole, tales como: variaciones de conductividad térmica que afecta el poder aislante, daños estructurales, alteraciones de forma y volumen, corrosiones en metales y aleaciones, entre otros. Lo que se estudia con más profundidad en esta tesis es el efecto del agua sobre el material que produce o genera las condiciones favorables para el crecimiento de moho, como ya se mencionó, el agua es el factor más importante en la formación de moho.

Estos efectos dependen también del tiempo de permanencia del agua, de la temperatura, ciclos de hielo deshielo o evaporación condensación u otros. Sobre el material completo, siendo también importante los solubles, componentes y agua interior que lo conformen.

Si bien el comportamiento de los materiales de construcción frente a la humedad es complejo, se pueden clasificar y especificar para cada categoría el efecto y comportamiento frente a la humedad:

1) Materiales pétreos:

Los pétreos usados en la construcción son impermeables. No obstante pueden ocurrir filtraciones de agua entre juntas cuando entre ellos se usan morteros de pega no impermeables. Si ello ocurre en cimientos u otros elementos en zonas de heladas fuertes, pueden producirse solidificación del agua con el consiguiente aumento de volumen, cuya fuerza de expansión es tan fuerte que puede separar grandes bloques pétreos, debilitándolos estructuralmente.

2) Materiales hidráulicos:

Son aquellos que se cristalizan con ayuda de agua de amasado, principalmente hormigones de masa, morteros de pega, estucos y yesos. El yeso anhidro está constituido por sulfato de calcio que toma dos moléculas de agua para cristalizar. Se usa como enlucidos y estucos. También se usa extensamente en la fabricación de planchas de yeso cartón y molduras.

No presentan alteraciones de importancia en presencia de humedad, aunque los hormigones de menor densidad y los yesos pueden formar capilares que le permiten trasladar agua incluso hacia arriba por ascensión capilar. El sulfato de calcio húmedo puede producir corrosiones en metales en contacto con él, además no presenta resistencia a la intemperie por lo que se utiliza sólo en interiores.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

Si la humedad en un muro de hormigón armado logra penetrar, en el caso de la humedad por condensación por ejemplo, puede provocar corrosión en su armadura y a la larga pérdida importante en la resistencia estructural.

Los hormigones livianos presentan una mayor cantidad de poros y burbujas de aire, por tanto la cantidad de agua que pueden absorber es también mayor. En general estos hormigones absorben humedad con facilidad pero la disipan de manera lenta (hormigón celular por ejemplo), por lo que deben protegerse las armaduras que contengan.

3) Materiales cerámicos:

En Chile es común el ladrillo hecho a mano llamado "chonchón", pero actualmente las construcciones usan ladrillos hechos a máquina, mucho más regulares en sus características y con una gran variedad de formas y tamaños. Se fabrican macizos y huecos lo que permite alivianar la construcción y reforzar su interior por medio de enfierradura (muros reforzados). Los ladrillos se usan principalmente para confeccionar muros uniéndolos por medio de mortero de pega a base de cemento. En general los muros de ladrillo deben protegerse debidamente de la lluvia o de aguas apozadas, por ejemplo en sobrecimientos.

Como en la construcción de muros se necesita que los ladrillos se humedezcan para no extraer agua del mortero de pega, los muros una vez construidos dejan importante cantidad de agua aprisionada en su interior. Ello es causa de numerosos problemas posteriores.

4) Maderas:

La madera es un material orgánico compuesto principalmente de celulosa y lignina con gran cantidad de capilares por donde la savia alimenta al árbol desde sus raíces. Las maderas usadas en la construcción provienen de diferentes tipos de árboles. Los de rápido crecimiento, tales como pino radiata (llamado comúnmente pino insigne) y álamo, producen maderas de baja densidad ($\approx 400 \text{ kg/m}^3$), en cambio los árboles de lento crecimiento producen maderas de alta densidad ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$) tales como roble o alerce.

Las maderas de baja densidad cambian su volumen según la cantidad de humedad que contienen, a mayor humedad la madera se hincha más dando pie a torceduras y cambios de volumen indeseables. Es necesario proteger la madera frente a la humedad ya que el exceso de ésta fomenta la aparición de mohos y hasta de pudrición. Además las maderas blandas pueden ser atacadas por insectos destructores (termitas), presentes en varias regiones del país.

Los derivados de la madera como: tableros contrachapados, tableros de partículas, tableros de fibra, tableros de lana de madera aglomerada con diversos productos, entre otros productos tienen sus propias cualidades y usos y casi todos son dañados por el agua líquida, por tanto no son aptos para su uso en el exterior a menos que se les protejan convenientemente y se realicen mantenciones adecuadas a esa protección.

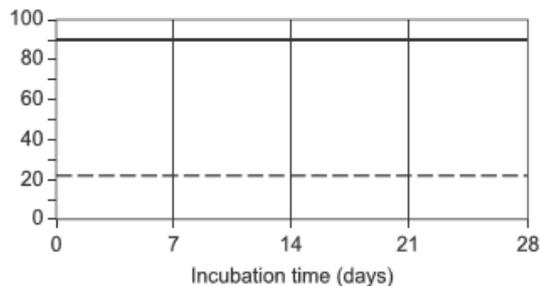
Existen estudios realizados sobre madera que describen la susceptibilidad de esta a la formación de moho, considerando que es un material con gran cantidad de proteínas y que en general las condiciones de confort son favorables a la formación de moho sobre superficies de madera.

Varios parámetros del material afectan el tiempo necesario para el desarrollo de moho en la madera. No es posible predecir la susceptibilidad general de la madera al moho basándose sólo en unos pocos datos, ya que se ve afectada por parámetros como la estructura de la superficie, especies de madera e incluso el patrón de aserrado (Johansson 2014). Para poder predecir la susceptibilidad al moho de la madera en general, es necesario analizar un gran número de muestras con diferentes propiedades, así como cualquier alteración o preparación reciente de la superficie.

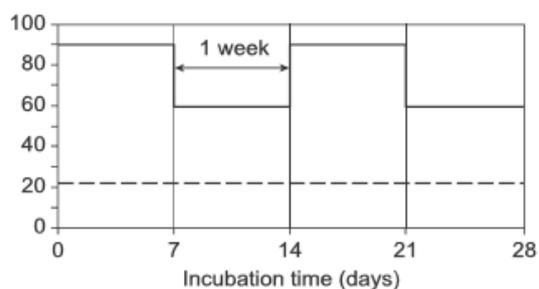
Johansson también investigó el efecto de las variaciones cíclicas de temperatura y humedad sobre el crecimiento de moho en la superficie de la madera y demostró que las condiciones de este sustrato no afectan

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

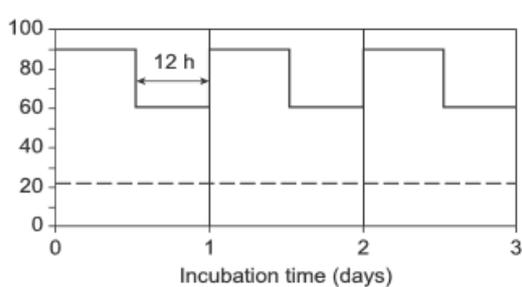
la reacción del moho a las condiciones ambientales estresantes en términos de humedad relativa y temperatura.



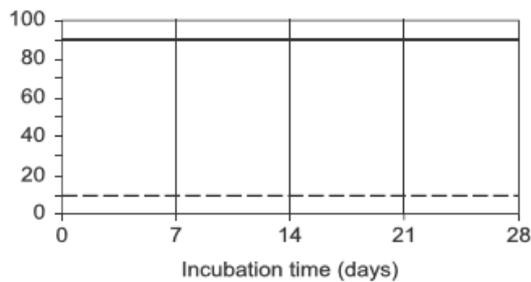
Esquema de prueba A



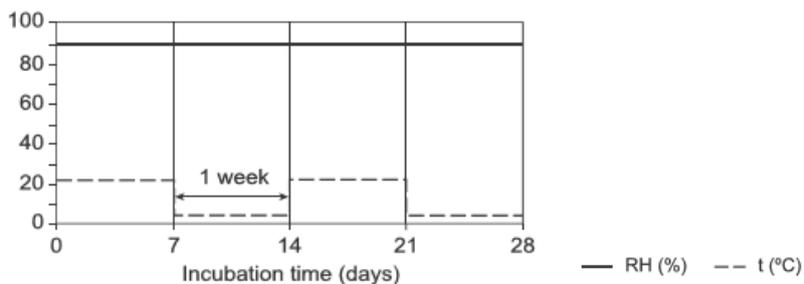
Esquema de prueba B



Esquema de prueba C



Esquema de prueba D



Esquema de prueba E

Figura N° 18: Esquemas de prueba utilizados (P. Johansson et al. 2013)

Dicho de otra manera, cuando se trata de un material rico en proteínas como la madera, sus condiciones no van a afectar a la reacción del moho a las variaciones cíclicas de temperatura y humedad relativa ambiental.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

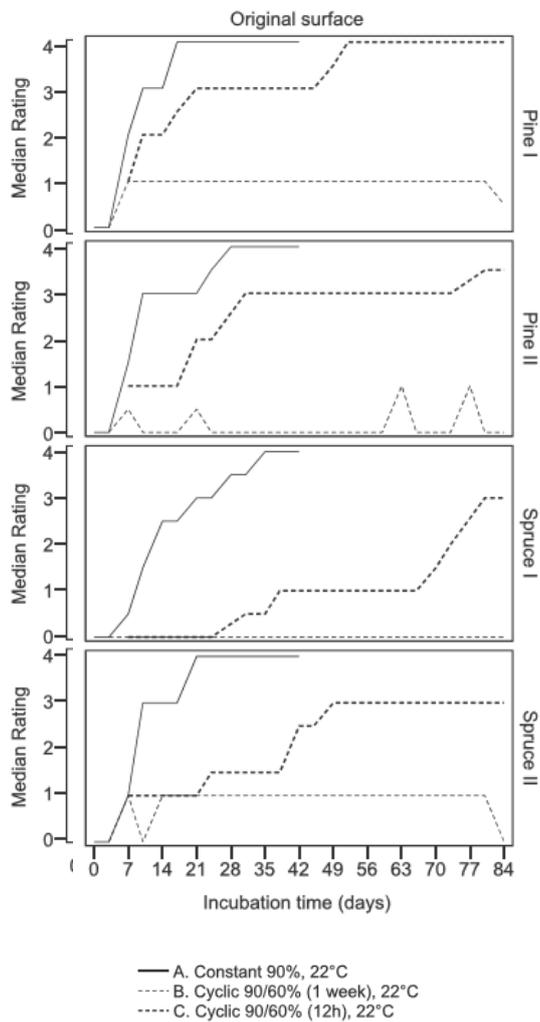


Figura N° 19: Mediana de la tasa de crecimiento del moho a lo largo del tiempo para todas las superficies probadas cuando la humedad relativa se alternó (P. Johansson, 2013)

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

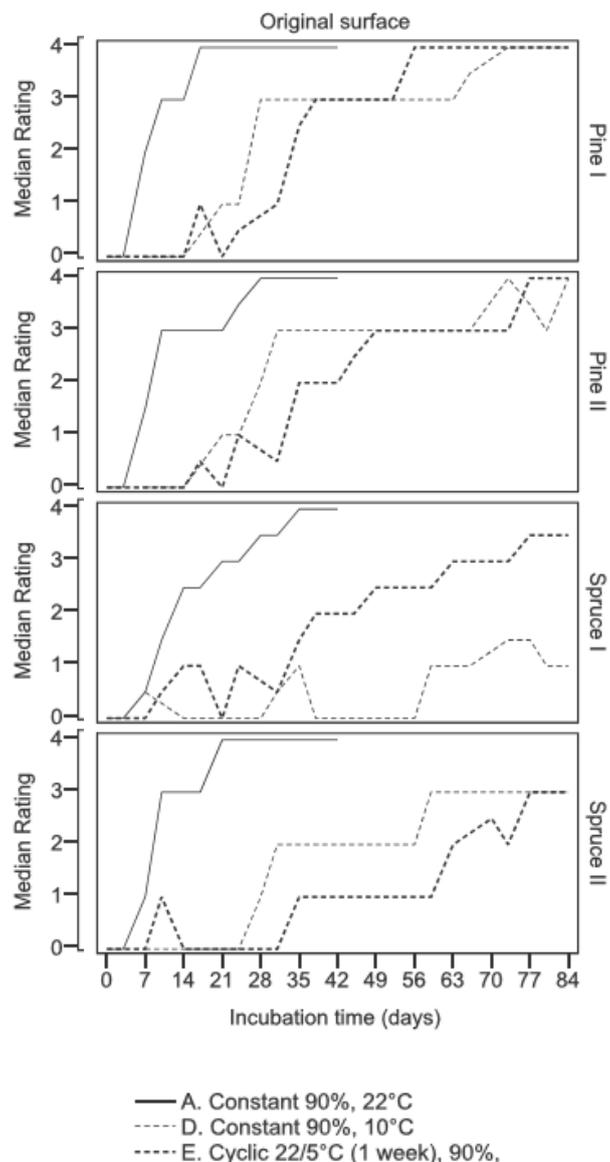


Figura N° 20: Mediana de la tasa de crecimiento del moho a lo largo del tiempo para todas las superficies probadas cuando la temperatura se alternó (P. Johansson et al., 2013)

Más específicamente, la variación de temperatura, dentro del rango favorable al crecimiento del moho sobre la madera, no afecta la reacción del moho, no así las fluctuaciones de humedad relativa. Estas fluctuaciones de humedad relativa y el tiempo de duración de las condiciones favorables y desfavorables son decisivas sobre la reacción del moho y su crecimiento.

5) Vidrios:

Los vidrios son arenas o silicatos fundidos insensibles a la humedad, sin embargo, dada su mala resistencia térmica, las ventanas son los primeros elementos donde se suele depositar agua de condensación, que si es abundante, corre por ellos haciendo daño en los marcos y juntas.

6) Metales:

Los metales presentan una alta impermeabilidad al agua y vapor de agua. Dada su elevada conductividad térmica pueden formar puentes térmicos que facilitan la condensación de vapor de agua sobre su superficie.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

Los metales, en contacto con agua ligeramente salina (electrolitos), forman pares galvánicos generando corrientes eléctricas locales que los corroen rápidamente.

7) Pinturas:

El crecimiento de moho en los materiales de decoración ha sido estudiado principalmente en aplicaciones exteriores que en interiores. Becker et al (1986) y Becker y Puterman (1987) estudiaron el efecto de la porosidad de la pintura, en relación con la concentración de volumen de pigmento, sobre el crecimiento de *Aspergillus Niger* y *Penicillium Expansum* en pinturas de acetato de polivinilo y emulsiones acrílicas al 97% RH. El crecimiento de hongos aumentó significativamente para las pinturas de polivinilo por encima de este valor.

Otros autores estudiaron el requerimiento mínimo de agua para el crecimiento de moho en materiales como el papel mural pintado, específicamente Grant et al (1989) concluyeron que, en el papel de viruta de madera pintado, los tipos de moho *Aspergillus Versicolor* y *Penicillium Chrysogenum* pudieron crecer después de 3 semanas de exposición a 25 °C y de una HR estable de alrededor de 79%. Además, su estudio mostró que la naturaleza del sustrato base afectaba el crecimiento de moho en el recubrimiento, pero no se pudo establecer un patrón consistente para todas las especies de hongos examinadas.

8) Papel Mural:

El crecimiento de moho en papel mural se determina principalmente por la cantidad de material orgánico que este tiene, la mayoría son de papel de celulosa por lo que pueden proveer la cantidad de proteínas necesarias para el crecimiento del moho. Además, muchos papeles murales tienen una terminación rugosa o con relieve, lo cual facilita la incrustación y adhesión de polvo y otras partículas que pueden transportar esporas de moho.

Ho et. al. (2015) Desarrollaron un estudio de predicción de formación de moho sobre papel mural como terminación interior, analizando la influencia de la propiedad higroscópica de los mismos. Se estudiaron seis tipos de papel mural y dos tipos de propiedades higroscópicas, estas últimas referidas específicamente a las propiedades de transmisión de vapor de agua y función de almacenaje de agua. Las muestras A, B y D eran principalmente con capa de PVC o vinilizados, C de acrílicos y E y F de un material natural poroso.

El resultado obtenido por Ho et. al. (2015) fue que existe una clara correlación entre el radio de crecimiento de moho y las propiedades higroscópicas del papel mural, esto último se puede observar en las siguientes figuras.

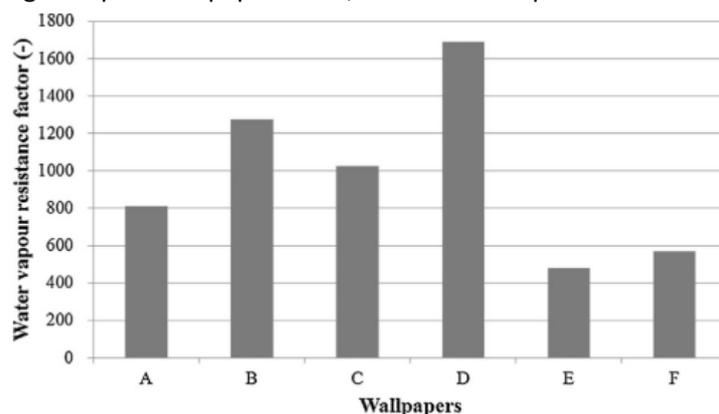


Figura N° 21: Resistencia al vapor de agua (μ) de los papeles murales estudiados.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

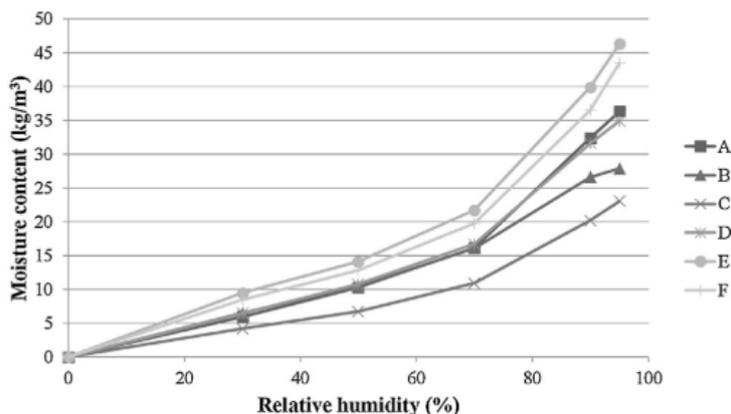


Figura N° 22: Función de almacenaje de agua de los papeles murales estudiados.

La capa vinílica o de PVC de algunos papeles murales (como el estudiado en esta tesis) puede constituir un freno de vapor y, dependiendo del corte constructivo analizado, esto puede evitar la formación de moho sobre la superficie interior del muro. La pregunta sería si además frenan el secado de los materiales de las capas interiores.

9) Placas de yeso y enlucidos de yeso

Las placas de yeso a menudo contienen aditivos orgánicos que causan susceptibilidad al crecimiento de hongos, el yeso cartón que tenemos en Chile por ejemplo, está recubierto por todas sus caras con papel. El crecimiento de hongos en este material ha sido estudiado por varios investigadores. Becker y Puterman (1987) encontraron crecimiento de hongos en placas de yeso liso (dentro de los 5 días después de la inoculación) y en enlucidos de yeso (dentro de los 9 días después de la inoculación), ambos con una humedad relativa del 97%. Francis (1987) probó enlucidos de yeso en un período de 10 semanas con una humedad relativa del 86%, 92% y 97%. El 86% de las muestras de yesos permanecieron prácticamente intactos.

Mediante observaciones sobre imágenes SEM del moho común de interior *Penicillium Chrysogenum* en enlucidos de yeso revelaron que todas las etapas de crecimiento ocurren dentro de las 73 horas después de la inoculación a 97% RH y 21 °C de temperatura (Adan and Samson 2011)

En la siguiente imagen se pueden observar las imágenes SEM de cada etapa del desarrollo del moho *Penicillium Chrysogenum* sobre yeso puro con nutrientes adicionales, incubados a 21 °C y 97% RH en la oscuridad.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

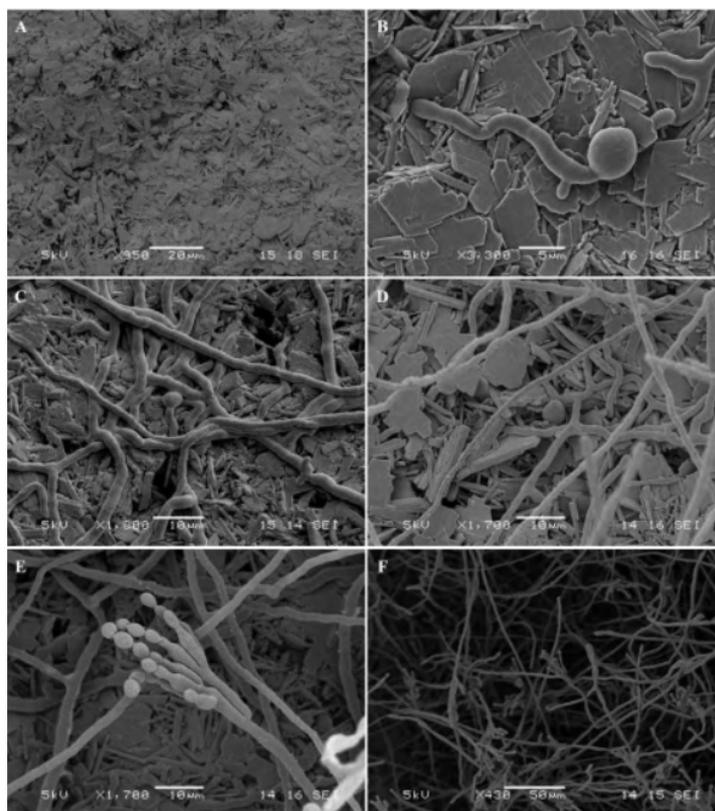


Figura N° 23: Estados de crecimiento de *Penicillium Chrysogenum* (CBS 52E8) en yeso puro con nutrientes adicionales, incubación a 21 °C y 97% RH en la oscuridad. (A) Conidios en la superficie del yeso, inóculo inicial, 15 min. (B) Conidio inflamado con tubo de germinación, 23 h. (C) Crecimiento de hifas extendido, 45 h. (D) Formación de hifas aéreas, 51 h. (E) Conidióforo esporulador, 69 h. (F) Masa micelial, con conidióforos esporuladores, que cubren el sustrato, 73 h (Adan and Samson 2011)

Se ha probado aumentar la alcalinidad del yeso para inhibir el crecimiento de moho pero debido a la carbonatación posterior el PH se altera hasta generar condiciones favorables a la formación de moho.

Los experimentos de Morgenstern (1982) demostraron que los aditivos de polivinilacetato (PVAC) reducen casi a la mitad el tiempo necesario para la carbonatación total sin embargo debido a los procesos químicos posteriores, la hidrólisis dio lugar a la formación de polivinilalcohol y acetato, siendo este último un posible nutriente que finalmente terminaría por promover la formación de moho.

Los resultados de las relaciones medidas entre los niveles de moho cultivables y totales por Pasanen (2000) revelaron que la pérdida de viabilidad de las esporas se produjo con retraso en la placa de yeso, probablemente porque el agua acumulada en la masa de yeso retrasó el proceso de secado.

10) Materiales varios:

Existen variedad de otros materiales que no pueden ser clasificados en alguna de las categorías anteriores. En el caso de aquellos materiales de fibrocemento, como lo son paneles, tejas, siding, etc. y aquellos materiales impermeabilizantes, como lo son algunas pinturas, láminas o fieltros, la presencia de humedad no altera sus propiedades y se comportan de buena forma en presencia de ésta. Por el contrario, aquellos materiales aislante térmicos, ven alteradas sus propiedades de conductividad térmica al estar en presencia de humedad.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

2.3.2. DAÑOS Y CAMBIOS EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Además de la formación de moho y otros microorganismos, los daños posibles de ocurrir se resumen a continuación:

- a) Eflorescencias
- b) Oxidación
- c) Corrosión en metales
- d) Aumento conductividad térmica

Como ya se ha mencionado, la humedad provoca variados efectos en ciertos materiales de construcción. Tal como la disminución en la aislación térmica de materiales porosos. Ello se debe a que los poros presentes en el material, están llenos de aire con una conductividad de este ($\lambda_{\text{aire quieto}} = 0,026\text{W/mK}$) pero al humedecerse el material, los poros con aire se llenan de agua cuya conductividad térmica es 22 veces mayor que la del aire ($\lambda_{\text{Agua}} = 0,58\text{W/mK}$). La consecuencia es que el material se hace más conductor del calor.

Se producen así pérdidas o ganancias de calor indeseables cuando estos materiales forman parte de la envolvente. Este fenómeno produce mayores gastos de energía para acondicionamiento térmico.

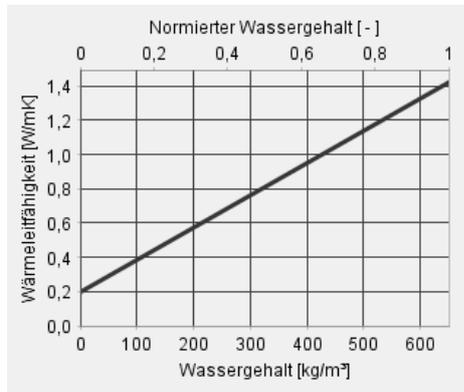


Figura N° 24: Variación de conductividad térmica de una plancha de yeso cartón en relación a su contenido de agua.

- e) Variación del factor de resistencia al vapor de agua

Cuando se varía la humedad de un material, el contenido de esa agua modifica al mismo tiempo la resistencia al paso de vapor de agua ya que los poros ocupados antes por aire, se ocupan con agua.

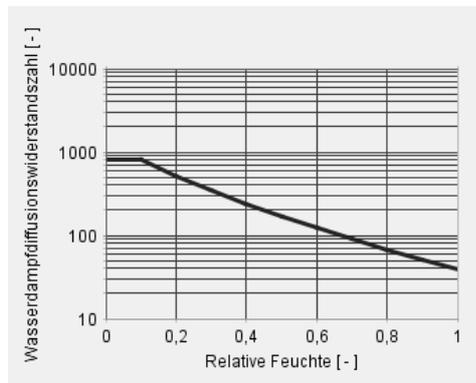


Figura N° 25: Variación del factor de resistencia al vapor de agua en relación a la humedad relativa contenida.

- f) Desprendimiento

Puede ser que los efectos de la humedad en los materiales no provoque formación de moho pero será determinante el tiempo de presencia de esa cantidad de agua en el desprendimiento o destrucción de su

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

estructura. El desprendimiento y cambio en la estructura y forma del material puede generar nuevas condiciones favorables para la formación de moho.

2.4. MODELOS DE CÁLCULO HIGROTÉRMICOS EXISTENTES

Los fenómenos físicos del transporte de calor y humedad son complejos por lo que para su cálculo se han desarrollado diversas metodologías siendo estas diferenciadas entre cálculos estáticos (simplificados) y cálculos dinámicos.

Los cálculos estáticos son simplificados y suponen ciertas condiciones de borde para poder realizarse, el método que se utiliza es denominado Método Glaser, que corresponde al método descrito en el capítulo de la NCh 1973 y que se utiliza en la herramienta de cálculo de condensaciones desarrollada por DITEC.

Los cálculos dinámicos se basan en ecuaciones de métodos numéricos, simuladas computacionalmente, se denomina Método de Simulación Numérica, siendo el software WUFI uno de ellos.

En la siguiente tabla se resumen las metodologías de evaluaciones higrotérmicas existentes y su comparación:

Tabla N° 6: Resumen las metodologías de evaluaciones higrotérmicas existentes y su comparación (Little et al. 2015)

Enfoque metodológico	Sistema de estado - estable	Sistema de estado - transitorio
Método de diseño	Resuelve ecuaciones simplificadas y desacopladas	Resuelve ecuaciones complejas numéricamente
Tipo de evaluación	Método Glaser	Simulación numérica
Estándar asociado	BS EN ISO 13788 (NCh 1973)	BS EN 15026
Base de evaluación	Doce cálculos mensuales para un período de evaluación de un año	Conjunto de cálculos por hora para un período de evaluación de varios años

La diferencia entre el método de cálculo estático y dinámico consiste en la cantidad de parámetros de entrada que cada uno considera. El método de cálculo estático solo considera parámetros relacionados con las temperaturas y humedad, y su relación con las presiones del vapor de agua dado por el corte constructivo y por el clima donde se encuentra esa solución evaluada.

El cálculo dinámico además de todo esto puede considerar las características propias de los materiales que componen el elemento o corte constructivo además de otros parámetros climáticos que el cálculo estático no considera (la lluvia y viento).

Sin embargo, la mayor diferencia entre ambos cálculos es el tiempo de evaluación, mientras el cálculo estático se realiza en un periodo, el cálculo dinámico se puede realizar en años si se requiere, además de tener un detalle en tiempo real, pudiendo además regular el paso del tiempo. Este enfoque de evaluación permite que los parámetros de entrada cambien con el tiempo y, por lo tanto, se lo denomina sistema de estados transitorios (Little, J. et al, 2015).

2.4.1. Cálculo estático

El método Glaser es un procedimiento de evaluación de riesgos de condensación en los sistemas constructivos. El procedimiento descrito en la NCh 1973:2014 (BS EN ISO 13788: 2012), consiste en un método de cálculo simplificados, que suponen que el transporte de humedad en o a través del elemento constructivo es solo por difusión de vapor y utiliza datos climáticos mensuales, asumiendo además condiciones unidimensionales, en estado estacionario.

En el capítulo de revisión de NCh1973 se explicó en qué consiste el método Glaser y su aplicación en la herramienta desarrollada por la DITEC.

Esta norma se puede aplicar para calcular lo siguiente:

- La temperatura superficial interior de un componente o elemento de construcción bajo la cual es probable la formación de moho, dada la temperatura y humedad relativa interior.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

- La evaluación del riesgo de condensación intersticial debida a la difusión de vapor de agua.
- El tiempo necesario para que el agua, desde cualquier fuente, en una capa entre dos capas altamente resistentes al vapor se seque, y el riesgo de condensación intersticial se presente en otra parte del componente durante el proceso de secado.
- Es importante destacar las limitaciones de esta norma, la cual no incluye los siguientes fenómenos físicos:
 - La variación de las propiedades del material con contenido de humedad.
 - La succión capilar y la transferencia de humedad líquida dentro de los materiales.
 - El movimiento de aire desde el interior de la edificación hacia el componente a través de brechas o dentro de espacios de aire.
 - La capacidad higroscópica de los materiales.
 - Consecuentemente, el método es aplicable sólo cuando los efectos de estos fenómenos se pueden considerar despreciables.

Estas evaluaciones unidimensionales no pueden explicar las pérdidas de calor elevadas que se producen en las uniones de construcción, que a su vez pueden conducir a temperaturas superficiales más bajas (Little, J. et al, 2015).

Es así que entonces este método es fácil de aplicar, pero se debe tener claro que es un cálculo simplificado y que no se puede aplicar en todos los casos. Por otra parte, se centra en la determinación de formación de condensaciones superficiales e intersticiales y no en la formación o no de moho.

2.4.2. Cálculo dinámico

El método de simulación numérica es un procedimiento de evaluación de riesgos de condensación en los sistemas constructivos, que incluye en su evaluación, a diferencia del método Glaser, la precipitación, la higroscopicidad y el transporte de líquidos. La simulación numérica para evaluaciones higrotérmicas se desarrolló en la década de los '90, y su uso más general fue posible gracias al desarrollo de la tecnología de las computadoras. En 2007, se publicó el primer estándar británico sobre simulación numérica para evaluaciones higrotérmicas: BS EN 15026: 2007 (Little, J. et al, 2015). Por ahora en Chile, no existe una norma que haga referencia a los cálculos dinámicos o numéricos.

Como ejemplo el software WUFI además del cálculo higrotérmico puede incluir un análisis de la posible formación de moho. El software mencionado también permite una mejor visualización del corte constructivo, acumulación de agua, radiación, temperaturas y humedades relativas.

Tabla N° 7: Características del material considerado en el software WUFI

1	Densidad (kg/m3)	8	Coef. de resistencia al paso de vapor de agua, dep.e de la humedad (-)
2	Porosidad (m3/m3)	9	Humedad contenida típica (kg/m3)
3	Calor específico (J/kgK)	10	Espesor (m)
4	Conductividad térmica fija (W/mK)	11	Conductividad térmica, dependiente de la humedad relativa (W/mK)
5	Coeficiente de resistencia al paso de vapor de agua fija (-)	12	Conductividad térmica, dependiente de la temperatura (W/mK)
6	Contenido de agua (kg/m3)	13	Entalpía (J/kg)
7	Coeficiente de transporte de agua líquida (kg/m2)	14	Origen de la información del material

La norma BS EN 15026: 2007 describe con más detalle el alcance y las limitaciones de la norma de simulación numérica:

Esta norma especifica las ecuaciones que se utilizarán en un método de simulación para calcular la transferencia no constante de calor y humedad a través de las estructuras del edificio.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

Las ecuaciones en esta norma tienen en cuenta los siguientes fenómenos de almacenamiento y transporte unidimensional:

- almacenamiento de calor en materiales de construcción secos y agua absorbida;
- transporte de calor por conducción térmica dependiente de la humedad;
- transferencia de calor latente por difusión de vapor;
- almacenamiento de humedad por absorción de vapor y fuerzas capilares;
- transporte de humedad por difusión de vapor;
- transporte de humedad por transporte de líquidos (difusión superficial y flujo capilar).

Las ecuaciones descritas en este estándar consideran las siguientes variables climáticas:

1. temperatura interna y externa;
2. humedad interna y externa;
3. radiación solar y de onda larga;
4. precipitación (lluvia normal y de conducción);
5. velocidad y dirección del viento.
6. Las ecuaciones higrotérmicas descritas en esta norma no se aplicarán en los casos en que:
7. La convección tiene lugar a través de agujeros y grietas;
8. Los efectos bidimensionales desempeñan un papel importante (por ejemplo, el aumento de la humedad, las condiciones alrededor de los puentes térmicos, el efecto de las fuerzas gravitacionales);
9. Fuerzas hidráulicas, osmóticas, electroforéticas están presentes;
10. Las temperaturas medias diarias en el componente superan los 50° C.

En una simulación numérica, acopladas, las ecuaciones diferenciales se resuelven para los procesos de transporte de calor y humedad para cada elemento de rejilla y unidad de tiempo seleccionada (normalmente una hora), utilizando como condiciones de contorno, los datos ambientales interiores, y para exterior, los datos climáticos. Este proceso se repite durante el período de simulación. Para una simulación que utiliza un período de simulación de diez años e intervalos por hora, esto dará como resultado 87.600 conjuntos de cálculos. Este proceso iterativo se ilustra en la Figura 26 con un diagrama de flujo.

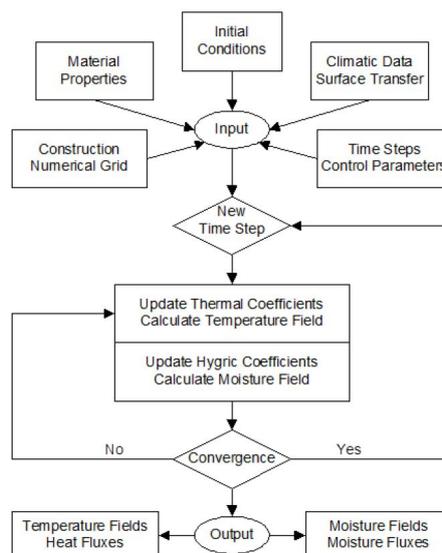


Figura N° 26: Diagrama de flujo que muestra el proceso iterativo en el que se basa el método de simulación numérica (Künzel 1995)

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

La simulación durante un período de tiempo seleccionado da como resultado una cantidad importante de datos de salida, registrando los cambios de temperatura, humedad, contenido de agua y presión de vapor. Estos datos se basan en las propiedades de los materiales y las condiciones de borde. Los tipos de resultados se pueden ver juntos, como una película, o por separado, en forma de gráfico o como una hoja de cálculo. Como criterio de evaluación, el estándar británico no establece límites específicos en la cantidad de acumulación de humedad. Sin embargo, se plantean criterios generales, estos son:

1. El criterio más importante: la humedad no debe acumularse en el tiempo. La condensación de agua en el componente del edificio debe poder secarse nuevamente. Si el contenido de humedad en el componente sigue aumentando, incluso lentamente, tarde o temprano tendrá problemas.
2. Los materiales de construcción que entran en contacto con la humedad no deben dañarse (por ejemplo, por corrosión o crecimiento de moho).
3. Los materiales de construcción minerales, generalmente no están en riesgo, algunos de ellos pueden ser susceptibles al daño por heladas si contienen mucha humedad.
4. La madera no debe exceder el 20% en masa de humedad durante un periodo prolongado; de lo contrario, puede aparecer crecimiento de moho (posible excepción: aumento de la humedad cuando las temperaturas son bajas).

El software WUFI considera además las indicaciones de la normativa alemana, en especial DIN 4108 apartados 3 y 8, que se revisan en detalle en el capítulo respectivo.

En el capítulo 4.3. se desarrolla el cálculo del corte constructivo estudiado en el software WUFI. En ese capítulo además de los resultados se podrá visualizar los cuadros de datos, gráficos y resultados que entrega el software.

2.5. MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE CRECIMIENTO DE MOHO EXISTENTES

Existen variados métodos de cálculo de predicción de crecimiento de moho, dentro de lo cual se encuentra WUFI en su parte básica Pro (a través del gráfico de Isopletas resultantes), en su complemento WUFI Bio y WUFI VTT. Para esta investigación se desarrollará el cálculo con las tres herramientas de cálculo dinámico. Sin embargo, existen otros métodos que varían en su modelo de cálculo, consideraciones, precisión, interfaz, etc. Muchos se basan en las primeras investigaciones al respecto (por ejemplo, en las Isopletas de Seldbauer) y luego se desarrollan para hacer el cálculo más preciso. Dentro de los métodos de predicción de crecimiento de moho y sus desarrolladores se destacan los siguientes:

Tabla N° 8: métodos de predicción de crecimiento de moho y sus desarrolladores

Basados en modelos de Isopletas		Otros modelos desarrollados	
1	Sedlbauer – WTA 6.3 (2001) – DELPHIN PostProc 2	1	VTT model from Viitanen (1999) – DELPHIN PostProc 2
2	Ayerst, Smith, Hill (1969-1982)	2	Johansson’s mould growth indices (S. Johansson 2010)
3	Clark and Rowan (ESP-r, 1999)	3	Fungal index (K. Abe 2011)
4	Hens (1999)	4	MRD model (Thelandersson, 2013)
5	Moon (2005)	5	m-model (Togero, 2011)
6	P. Johansson (2014)		

Gradeci et al. (2017) compararon los modelos de crecimiento de moho computacionales y concluyeron que aunque se registraron varios resultados similares entre los tres modelos de moho de la figura siguiente, los desacuerdos entre ellos siguen siendo sustanciales.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

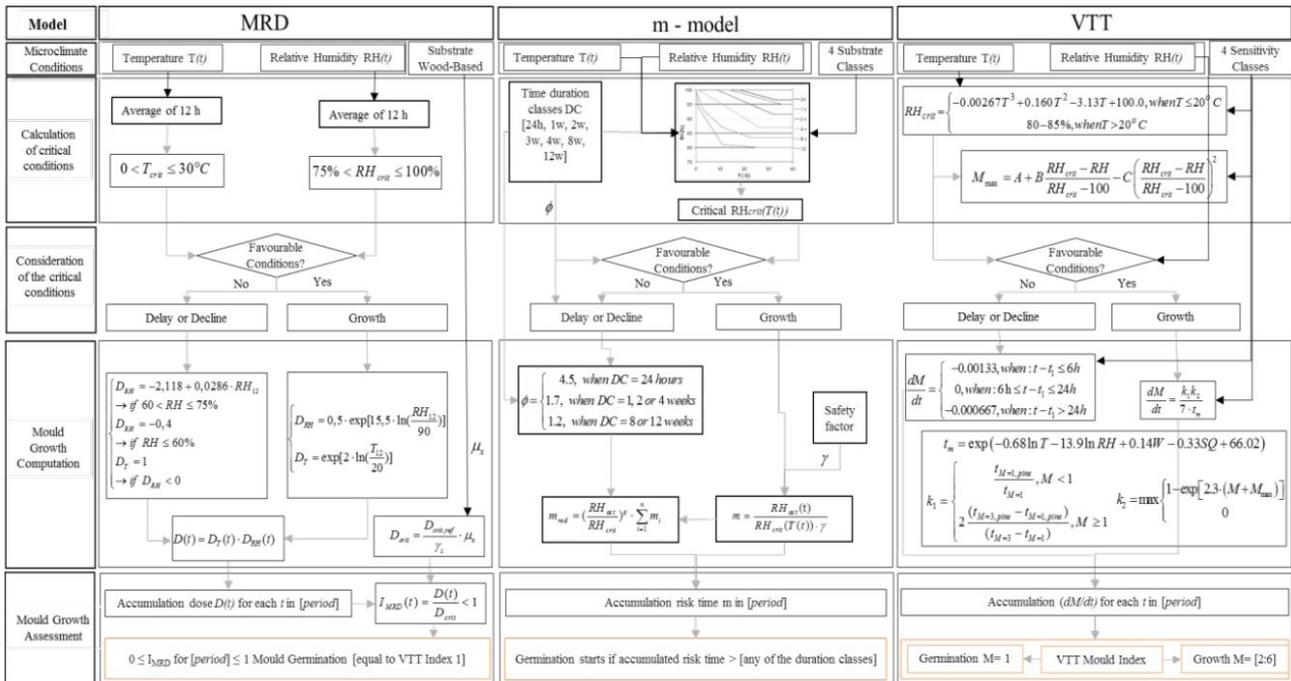


Figura N° 27: Marco de cálculo computacional de moho para los modelos MRD, m-model y VTT.

El comportamiento del crecimiento del moho es muy sensible a la decisión de qué parámetros se consideran, por lo que es necesario prestar atención a la hora de analizar e interpretar los resultados, especialmente en los estudios comparativos. La evaluación del crecimiento del moho debe considerarse como un intento de predecir la probabilidad de que se produzca moho, más que el crecimiento exacto del mismo (Gradeci et al. 2017).

El modelo predictivo de moho de WUFI (Pro, Bio y VTT) se basa en el modelo isopletras desarrollado por Seldbauer (2001) y posteriores modelos evolucionados (Viitanen 1997, Moon 2005) que se detallarán a continuación.

2.5.1. Métodos gráficos probabilístico de germinación de moho

La ocurrencia de moho implica los aspectos locales, particulares y hasta idiosincrásicos de un edificio durante su funcionamiento. Estos comportamientos inesperados y no controlados no se pueden capturar mediante métodos de evaluación de rendimiento deterministas que existen actualmente.

Moon (2005) desarrolló un indicador de rendimiento probabilístico para el riesgo de crecimiento de moho mediante el tratamiento del moho como un fenómeno de riesgo y estado límite, considerando las fuentes de incertezas. Este enfoque requirió un método confiable para determinar al riesgo de crecimiento cuantificado del moho y la extensión de la capacidad de simulación estándar para tener en cuenta los mecanismos adicionales del fenómeno del moho. El desarrollo de este método también implica una incertidumbre en los parámetros de construcción, incluida la variación natural de las propiedades higrotérmicas en los materiales de construcción.

En el estudio desarrollado por Moon, la etapa de germinación del moho es un criterio limitante para la determinación del riesgo, realizado mediante el uso del método gráfico de germinación de moho, basado en las condiciones ambientales locales, calculadas a partir de modelos higrotérmicos y un gráfico de germinación de moho estándar. Este método realiza un seguimiento de las condiciones ambientales (temperatura superficial y humedad relativa) anteriores para que se pueda considerar el efecto de las condiciones fluctuantes. Un

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

estudio comparativo utilizando las curvas de limitación de moho mostró que el método gráfico de germinación de moho podría proporcionar resultados cuantitativos de evaluación en términos de riesgo de crecimiento del moho.

La simulación de humedad estándar se amplió en este estudio para tener en cuenta los mecanismos o variables adicionales del fenómeno de formación del moho (por ejemplo, el puente térmico, la mano de obra o infiltración), basado en cuatro categorías de causas identificadas que representan las cuatro áreas en las que una extensión de simulación con la capacidad de generar evaluaciones precisas. Estas extensiones se realizaron utilizando una mezcla de herramientas de simulación existentes, cada una especializada en un dominio particular de transporte de calor, aire y humedad. Los efectos del puente térmico y la posible incorrecta ejecución de parte de la mano de obra se expresan con el factor de temperatura. Al incluir el factor de temperatura en ciertos detalles del edificio en el enfoque de simulación mixta, los días de riesgo de crecimiento del moho pueden representarse aproximadamente como un problema específico.

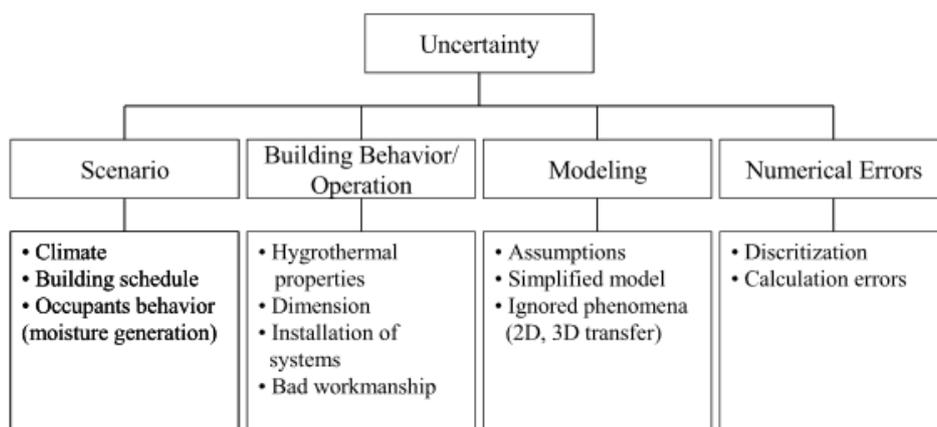


Figura N° 28: Fuentes de incertezas en el desempeño de la evaluación del riesgo de crecimiento de moho (Moon and Augenbroe 2005)

Las incertidumbres de cada parámetro de construcción se expresan como valores superiores/inferiores con una distribución de probabilidad basada en los datos disponibles en la literatura, diferentes modelos y mediciones de campo. La incertidumbre asociada con el factor de temperatura se investiga estableciendo una relación empírica entre un puente térmico idealizado y la posible incorrecta ejecución de parte de la mano de obra. Las incertidumbres cuantificadas de los parámetros se propagan a través del enfoque de simulación mixta utilizando el método Latin Hypercube Sampling, que es particularmente adecuado para este propósito. Los resultados del análisis de incertidumbre proporcionan la distribución del riesgo de crecimiento de moho en un punto problemático en un edificio en particular. La identificación de parámetros dominantes que tienen una influencia importante en el riesgo de moho se realizó utilizando una técnica de cribado de parámetros.

El conocimiento de estos parámetros dominantes es vital, ya que apuntan a las áreas que requieren una atención especial durante el diseño y la construcción con el fin de garantizar un ambiente libre de moho durante el ciclo de vida de la instalación.

La aplicación del indicador de riesgo de moho desarrollado (MRI) se reporta en tres estudios de caso, los resultados de cada caso de estudio son alentadores. Indican que una distribución fiable del riesgo de crecimiento del moho puede resultar del análisis de incertidumbre, ya que la incidencia real del crecimiento del moho podría estar relacionada con el riesgo de moho establecido en cada caso.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

Este nuevo enfoque desarrollado por Moon parece ser capaz de explicar ocurrencias inesperadas y no deterministas del crecimiento del moho. Identifica además los parámetros que tienen efectos dominantes en el aumento del riesgo de moho, lo cual conduce a recomendaciones y directrices para diseñadores e ingenieros para garantizar un mejor comportamiento de la envolvente del edificio.

El nuevo indicador de rendimiento para el riesgo de moho es capaz de revelar los riesgos reales de moho que van más allá de la evaluación determinista. La identificación de los parámetros que tienen una influencia importante en el riesgo de moho puede proporcionar un avance largamente esperado para el control temprano del riesgo de moho, es decir, durante el diseño, la operación. Será necesario realizar una mayor calibración y validación, pero los primeros resultados reportados en la investigación de Moon (2005) indican que el nuevo indicador de riesgo de moho proporciona una base para establecer criterios de rendimiento del edificio que evitarán la formación del moho en la envolvente del edificio (Adan and Samson 2011).

2.5.2. Modelo Isopletas

Sedlbauer, (2001) logró establecer un modelo bio higrotérmico que predice el crecimiento de moho que, según como fue probado en diversos ejemplos, genera recomendaciones y conclusiones sobre la prevención de moho y hongos.

El modelo clasifica al moho u hongo según su peligrosidad en A, B y C según como se detalla a continuación:

- A:** muy peligroso, no se puede permitir.
- B:** peligroso dependiendo del tiempo de exposición.
- C:** no peligroso directamente con el individuo pero si con la vivienda.

El procedimiento trabaja de todas maneras con dos clases, la clase A y la clase combinada B/C.

El procedimiento desarrollado consiste en dos modelos predictivos: modelo Isopleta y modelo transitorio Bio-higrotérmico.

El modelo clasifica a los sustratos por su parte en 4 categorías:

- 0:** medio óptimo de cultivo.
- I:** materiales de origen biológico como papel y algunos aislantes.
- II:** materiales con estructura porosa, como aislantes no cubiertos.
- III:** materiales degradables, que no contienen ningún nutriente.

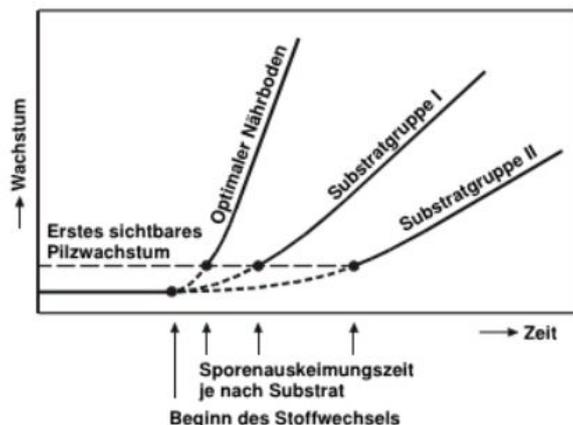


Figura N° 29: Germinación de esporas y crecimiento sobre distintos grupos de sustratos (Sedlbauer, 2001)

El crecimiento de los hongos se considera en el suelo de reproducción óptimo y en los grupos de sustrato I y II. Se dan las fechas del inicio metabólico del moho y el tiempo de germinación de las esporas influenciado por el sustrato, que generalmente se define por el primer crecimiento visible del moho.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

Las características de este método de predicción difieren de los métodos habituales para estimar una ruta de moho mediante la validación experimental múltiple, así como por una indicación diferenciada de los requisitos de crecimiento. En el modelo isopleta, para tres grupos de sustrato diferentes en dependencia de la temperatura y la humedad relativa, los tiempos de germinación de esporas o las tasas de crecimiento se especifican con precisión. Estos datos se refieren a todas las especies de hongos que se encuentran en los edificios de acuerdo con el conocimiento actual (ver capítulo normativa alemana), teniendo en cuenta los tiempos más bajos de germinación de esporas y las tasas de crecimiento más altas. Por lo tanto, sólo conociendo las condiciones límite higrotérmicas, para diferentes materiales de construcción y grados de contaminación, se puede calcular el tiempo que los hongos del moho necesitan germinar.

Después de la germinación, se vuelve predecible, con el que se espera el crecimiento del micelio al máximo. Para una óptima reproducción del suelo, los propios sistemas de isopletas permiten predecir la formación de moho para diferentes clases de peligro. El peligro para la salud que representan los hongos se dividió en tres clases, a cada una de las cuales se le asignan las condiciones de crecimiento para cada especie individual. Esto permite no sólo la predicción de la formación de moho para todos los hongos de una clase o grupo sino que también las evaluaciones individuales correspondientes. En el caso de las condiciones climáticas estacionarias límite, la formación de moho de acuerdo con el modelo de isopleta puede excluirse si no hay exceso del sistema higrotérmico que se muestra en los tallos isopleta para la germinación de las esporas.

Para ello, el curso de la respectiva LIM, que describe el límite más bajo de la actividad fúngica, se utiliza en el rango estructuralmente interesante entre 0 °C y 30 °C. Resulta que a altas temperaturas una humedad relativa más baja es suficiente para permitir la formación de moho, mientras que a alta humedad incluso las temperaturas más bajas pueden ser críticas. Por lo tanto, por primera vez se dispone de indicaciones diferenciadas, que permiten indicar la humedad relativa necesaria para la formación de hongos de moho para diferentes grupos de sustrato dependiendo de la temperatura. A una temperatura de 15 °C, por ejemplo, una humedad de aproximadamente 73% para la clase de peligro B/C y 77% para hongos críticos para la salud (clase A) y para grupos de sustratos I y II 77% y 82%, respectivamente. Los últimos valores mencionados se aplican a todas las ocurrencias de moho en edificios. En algunas especies parece que un aumento en la temperatura del aire ambiente, a menudo conocida como una medida para prevenir la formación de hongos, puede producir un mayor riesgo de moho. Al aumentar el aire de la habitación y por lo tanto la temperatura de la superficie por calentamiento adicional, la humedad relativa en la habitación y en las superficies disminuye, sin embargo, a una temperatura más alta, la humedad relativa necesaria para el crecimiento de los hongos disminuye también simultáneamente. El aumento del nivel de protección térmica es una medida óptima para reducir el riesgo de formación de moho en superficies interiores de componentes exteriores.

La Figura 30 muestra un nomograma basado en las curvas LIMBau (o LIM constructivo) correspondientes para determinar el máximo permisible humedad relativa en la habitación, en la que no hay más infestación de moho en el interior de un componente externo, dependiendo de la temperatura de la superficie interior de ajuste (imágenes inferiores) para los dos grupos de sustrato. La temperatura de la superficie interior se puede leer para una temperatura del aire ambiente de 16 °C (imágenes izquierdas) y 20 °C (imágenes derechas) dependiendo del coeficiente de transferencia de calor para diferentes temperaturas de aire exterior estacionarias (imágenes superiores). En el caso de la separación de puentes térmicos, la temperatura de la superficie interior determinada en el lugar del puente térmico puede asumirse directamente o se puede establecer un coeficiente de transferencia de calor ficticio para el área del puente térmico de manera simplista. Para la evaluación de estructuras escultóricas de construcción en condiciones límite climáticas difíciles, el método de cálculo higrotérmico WUFI se puede utilizar para controlar el curso inestacionario de la temperatura y humedad relativa en puntos interesantes de la estructura de construcción donde es de esperar

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

la formación de hongos, ya que se determinan los parámetros de entrada para el del cálculo biohigrotérmico. Esto da lugar por primera vez también la posibilidad de evaluar el efecto de los picos de humedad a corto plazo, por ejemplo, duchando o cocinando, en una posible formación de moho dependiendo de la estructura (por ejemplo, yeso sorptivo).

Con los cálculos biohigrotérmicos, el efecto de la humidificación inestacionaria en la hidratación y deshumidificación de las esporas fúngicas del moho se puede determinar directamente. Como ha demostrado la consideración del balance de la humedad en las esporas del modelo, los picos de humedad alta de una hora de, por ejemplo, 95% de humedad relativa por día no son inicialmente críticos. Sin embargo, para una duración de más de tres horas por día, la infestación por hongos se espera dentro de unas pocas semanas, especialmente con materiales en el grupo de sustratos I.

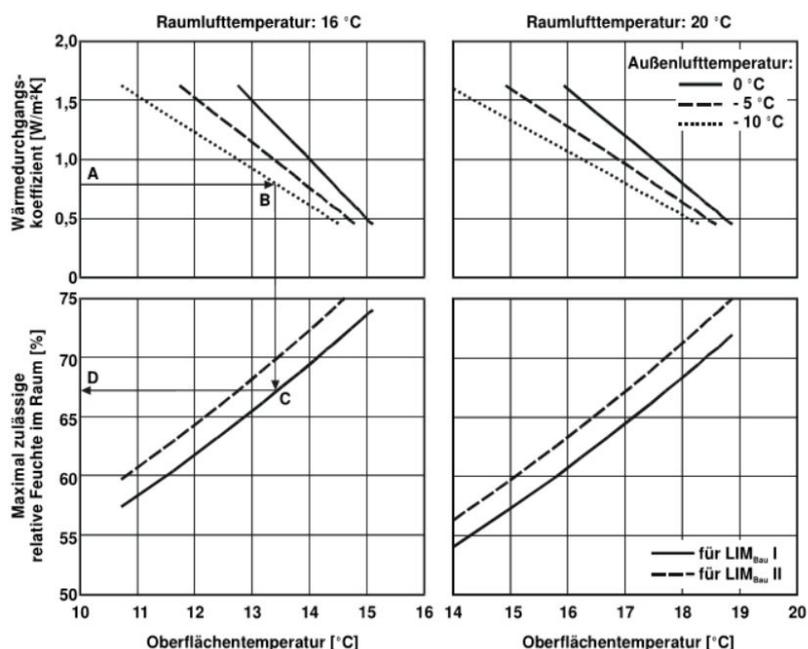


Figura N° 30: Nomograma para determinar la humedad relativa máxima admisible de la habitación, ambos que exceden la formación de moho se producen en una pared exterior, a una temperatura ambiente de aire de 16 °C (izquierda) y 20 °C (derecha) (Seldbauer, 2001)

Parte superior de la imagen:

Temperatura superficial dependiendo de la transmitancia térmica para diferentes temperaturas de aire exterior.

Parte inferior de la imagen:

Humedad relativa máxima admisible de la habitación dependiendo de la temperatura superficial para los grupos de sustrato.

Datos basados en:

Curvas de construcción LIMbau de los grupos de sustratos I y II.

Notas sobre el uso del gráfico:

A: Se lee la transmitancia térmica

B: Temperatura superficial dependiendo de la temperatura del aire exterior

C: Humedad relativa máxima (D) dependiendo de la temperatura superficial para los grupos de sustrato I y II.

Una validación técnica medible de los resultados de cálculo por muestreo es aconsejable dado que los valores característicos de los materiales subyacentes a los cálculos higrotérmicos, así como las condiciones límite climáticas que se producen en la práctica, se ven generalmente afectadas por fluctuaciones. La fiabilidad de los

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

cálculos biohigrotérmicos depende no sólo de los parámetros de entrada climática, sino que también de las características del modelo de esporas, es decir de la función de acumulación de humedad y de los valores Sd. Sin embargo, su medición es relativamente fácil porque tienen poca influencia en los resultados. Por otro lado, diferentes tiempos de germinación de esporas dan lugar a diferentes grupos de sustratos, con la ayuda de los cuales se determinan los niveles límite de agua. Por lo tanto, por razones de seguridad, en el caso de asignación no especificada de materiales de construcción a un grupo de sustratos para cálculos biohigrotérmicos, siempre se debe elegir el más favorable (es decir, grupo crítico) para el crecimiento del moho (Seldbauer, 2001).

2.5.3. Proyecto HAMSTAD

El proyecto HAMSTAD (2000-2002) fue un proyecto financiado por la UE cuyo objetivo era proponer una metodología de modelización de HAM (Heat, Air and Moisture) mejor que el método tradicional estático de Glaser. El proyecto constaba de dos partes: El paquete de trabajo 1 (WP1), que se centró en las normas y metodologías para la determinación de los coeficientes de transferencia de humedad y las propiedades de humedad de los materiales de construcción, y el paquete de trabajo 2 (WP2), que trató de las metodologías de modelización de la HAM y los métodos de evaluación para el desarrollo y la evaluación de programas informáticos unidimensionales transitorios para simulaciones higrotérmicas.

El algoritmo utilizado para estructurar el diseño del modelo físico constructivo es el que se muestra a continuación, que en esencia busca simplificar el modelo físico requerido en el análisis del comportamiento del HAM en elementos constructivos:

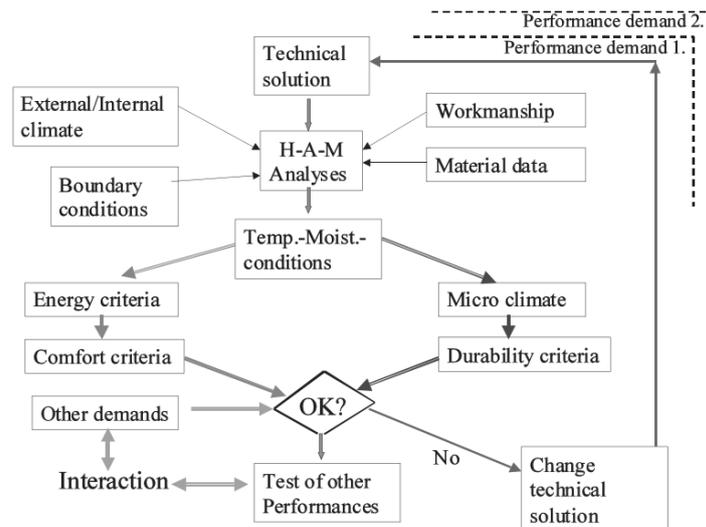


Figura N° 31: Algoritmo de diseño físico constructivo (modelamiento del paquete WP2) (Hangentoft, 2002)

El programa de simulación higrotérmica dinámica Delphin (John Grunewald 1997) permite el cálculo de la combinación de calor, humedad, aire y transportes en materiales porosos capilares, su validación la basa en los parámetros del proyecto HAMSTAD. Para la simulación higrotérmica dinámica se utiliza el software que se desprende de Delphin denominado COND. La simulación utiliza un método de solución numérica para ecuaciones diferenciales que describe los procesos de transporte. Los cálculos de validación se realizan para controlar los errores numéricos y la correcta implementación de las ecuaciones físicas.

Para ello se introducen, calculan y comparan casos de prueba predefinidos con soluciones de referencia o con los resultados de otros programas de simulación.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

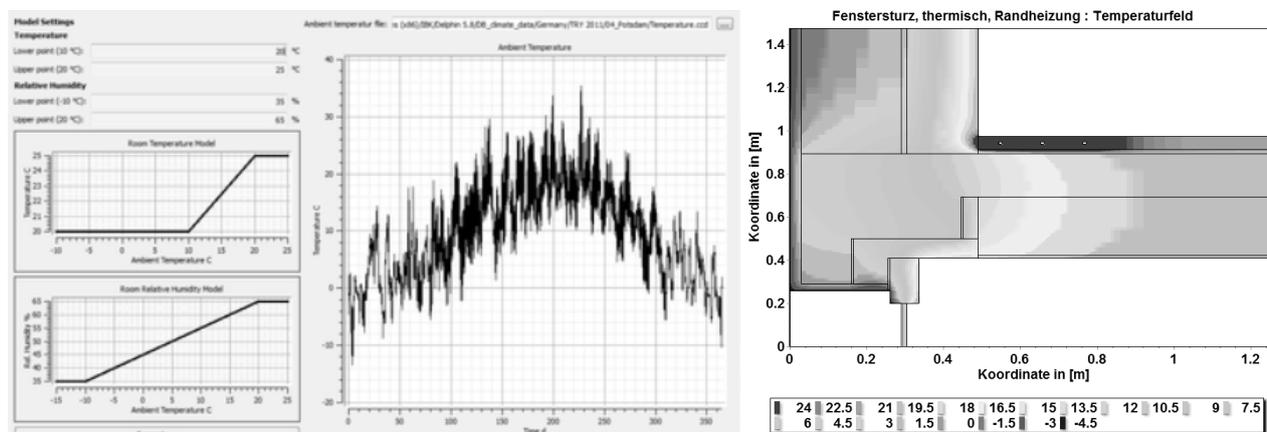


Figura N° 32: Imagen del análisis termográfico y ambiental del modelo higrotérmico en Delphin. (www. <http://bauklimatik-dresden.de/delphin/screenshots.php>)

El programa de simulación numérica Delphin puede ser utilizado para modelar y calcular el calor acoplado, la humedad, los procesos de transporte de aire en medios porosos capilares. Esto permite, entre otras cosas, evaluar las construcciones y los detalles constructivos en relación con aspectos de la física de la construcción, como la protección contra la humedad. Delphin es capaz de mapear geometrías unidimensionales y bidimensionales, calculando los procesos transitorios con el clima dinámico.

2.5.4. Evaluación de riesgo de germinación de moho

Como ya se ha detallado, la temperatura y la humedad relativa son los términos críticos para la germinación del moho. Las demás condiciones para la germinación del moho son fáciles de lograr, como el oxígeno, el PH y la nutrición adecuada. Generalmente se acepta que, cuando la temperatura es superior a 0 °C y la humedad relativa es superior al 80%, la espora germinará (WHO, 2009) y comenzará la formación de moho.

Entonces se define el siguiente índice de evaluación para la germinación del moho (Chen et al. 2017):

$$S_{RHT80} = \sum_{t=1}^n (RH - RH_i) \times (T - T_i)$$

Donde:

RH es la humedad relativa del muro (%)

RH_i es la humedad relativa crítica para la germinación del moho, que es igual al 80%, cuando la humedad relativa del muro es menor que 80% y mayor que 100% entonces *RH-RH_i*=0

T es la temperatura del muro (°C)

T_i es la temperatura crítica para la germinación del moho, que es igual a 0°C, cuando la temperatura del muro es menor a 0°C o mayor a 40°C entonces, *T-T_i*=0

La humedad relativa y la temperatura son obtenidas a partir de la simulación.

Este índice de germinación del moho considera la temperatura, la humedad relativa y la duración, puede utilizarse para comparar el riesgo de germinación del moho de diferentes objetos. Cuanto mayor es el índice, mayor es el riesgo de germinación del moho. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el índice se utiliza únicamente para comparar el riesgo de germinación de moho para diferentes condiciones en los muros de los edificios.

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

2.5.5. Índice de Crecimiento de Moho de Viitanen

Viitanen y Ojanen (2007) crearon un modelo o índice de crecimiento de moho que tiene una escala móvil de crecimiento de moho para indicar riesgos, en lugar de un criterio binario de aprobación/reprobación. Los descriptores de varios niveles de crecimiento de moho se muestran en la siguiente tabla. Estos niveles de crecimiento de moho varían de 0 (sin crecimiento) a 6 (el 100% de cobertura con moho visible).

Tabla N° 9: Niveles de Índice de crecimiento de moho VTT (MGI) (Ojanen et al. 2010)

Index	Growth Rate
0	No growth
1	Small amounts of mold detected only with a microscope, initial stages of local growth
2	Several local mold-growth colonies on the surface detected with microscopy
3	Visual findings of mold on surface <10% coverage, or <50% coverage of mold (microscope)
4	Visual findings of mold on surface, 10%–50% coverage, or >50% coverage of mold (microscope)
5	Plenty of growth detected visually, >50% visual coverage
6	Very heavy and tight growth detected visually (coverage 100%)

El índice del moho se calcula utilizando la temperatura y la humedad relativa en la superficie que se está examinando (por ejemplo, entre el aislante térmico y revestimiento), el índice subirá y bajará en función de las condiciones.

La superposición del modelo es el resultado de estudios experimentales realizados en laboratorio sobre albura de pino. Ojanen, Viitanen, et al. (2010) refinaron aún más el modelo, añadiendo factores tales como clases de sensibilidad para varios sustratos de materiales de construcción (muy sensibles, sensibles, medianamente resistentes y resistentes), así como un factor de "troquelado" (el índice de moho cae bajo condiciones menos favorables).

Varios trabajos de investigación validan este modelo y detallar las ecuaciones diferenciales y modelos de regresión utilizados para llegar a un índice de moho (MGI) (Viitanen et al. 2015; Ojanen et al., 2010; Gradeci et al., 2018). El modelo de simulación de moho explica el crecimiento y la disminución basada en tres parámetros: la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa (contenido de agua) y la sensibilidad del material al crecimiento de moho.

El modelo de crecimiento computacional se basa en la siguiente ecuación:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 660.2)} k_1 k_2$$

Donde:

T: Temperatura (°C)

RH: Humedad relativa (-)

K1 y k2: Coeficientes de intensidad

W: Especie de madera

SQ: Calidad de la superficie (para tipos de madera, para otros materiales es igual a 0)

El cálculo es para cada hora, y simula ambos crecimientos de moho y descomposición. El índice de crecimiento de moho oscila entre cero, lo que representa ningún crecimiento, y seis, lo que representa una cobertura del 100% de la superficie de mohos "apretados y pesados".

CAPÍTULO 2. CRECIMIENTO DE MOHO EN LA VIVIENDA

Esta investigación utiliza el programa de índice de crecimiento de moho VTT 2.1 de WUFI. Este software utiliza los resultados de simulación de WUFI Pro para probar el crecimiento del moho en cada material por separado. La herramienta requiere que el usuario exporte los datos horarios de humedad y temperatura del material de la simulación WUFI como entrada de "clima" para la simulación del moho. Además, el usuario debe especificar la sensibilidad del material al crecimiento de moho, que puede ser personalizado o escogido de una lista de materiales estándar suministrados por VTT.

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

3.1. NORMATIVA RELACIONADA EN CHILE

3.1.1. Artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones

En Chile, la reglamentación térmica para viviendas está contenida en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (O.G.U.C.), reglamento de la Ley General de Urbanismo y Construcciones, esta reglamentación establece valores de transmitancias térmicas máximas para complejos de techumbres, muros y pisos ventilados, y porcentajes máximos de superficies vidriadas según transmitancias térmicas, diferenciadas para 7 zonas térmicas del país (MINVU, 2018). Este instrumento regulatorio no establece restricciones para la condensación superficial e intersticial y menos para la formación de moho. Además esta reglamentación térmica restringe los porcentajes máximos de superficie vidriada respecto a paramentos verticales de la envolvente para tres tipos de vidriado.

Para la implementación de esta reglamentación térmica, se cuenta con un listado de soluciones constructivas donde se entregan soluciones específicas para el cumplimiento de la resistencia térmica mínima, sin considerar el comportamiento higrotérmico, condensaciones o formación de moho.

El año 2013, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, en conjunto con una mesa técnica, elabora una propuesta de actualización de la reglamentación térmica, denominada Norma Técnica – NTM11, la cual está compuesta por tres partes: acondicionamiento acústico, comportamiento higrotérmico y calidad del aire interior; y por primera vez se establecía requerimientos de desempeño asociados a la condensación superficial e intersticial utilizando para esto la NCh1973. Esta nueva norma además establece nuevas zonas térmicas basadas en NCh1079.

De todas maneras hasta la fecha no se sabe cuándo se va a hacer obligatoria esta norma o si antes de su aplicación sufrirá modificaciones, por lo que si la vivienda no se encuentra en una ciudad PDA, basta con que cumple el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

A continuación se detalla para cada zona climática la actual reglamentación térmica en relación a la transmitancia térmica máxima y resistencia térmica mínima para los elementos techumbre, muro y piso ventilado:

Tabla N° 10: Transmitancia y resistencia térmica para cada zona climática (Art. 4.1.10. OGUC, MINVU)

Zona	Techumbre		Muros		Pisos Ventilados	
	U W/m ² K	Rt m ² K/W	U W/m ² K	Rt m ² K/W	U W/m ² K	Rt m ² K/W
1	0,84	1,19	4,0	0,25	3,60	0,28
2	0,60	1,67	3,0	0,33	0,87	1,15
3	0,47	2,13	1,9	0,53	0,70	1,43
4	0,38	2,63	1,7	0,59	0,60	1,67
5	0,33	3,03	1,6	0,63	0,50	2,00
6	0,28	3,57	1,1	0,91	0,39	2,56
7	0,25	4,00	0,6	1,67	0,32	3,13

3.1.2. NCh1973:2014

La normativa existente que aplica para el cálculo de condensaciones es la NCh1973:2014 “Comportamiento higrotérmico de elementos y componentes de construcción – Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial – Métodos de cálculo”. Esta norma es una traducción modificada de la Norma Internacional ISO 13788:2012, las modificaciones principalmente apuntan a hacerla compatible y coherente con NCh853 y NCh1079.

Esta norma presenta un método de cálculo simplificado, que considera que el transporte de humedad es solamente mediante la difusión de vapor. La norma aborda específicamente los siguientes aspectos:

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

- 1) La humedad superficial característica que probablemente conduzca a problemas tales como la formación de moho en las superficies interiores de las edificaciones.
- 2) La condensación intersticial dentro de un componente de construcción.
- 3) Una estimación del tiempo necesario para que un componente, entre capas de alta resistencia al vapor que se han mojado por algún medio, se seque, y el riesgo de condensación intersticial que ocurre en otras partes del componente durante el proceso de secado.

Para el análisis de condensaciones esta norma desarrolla el cálculo del método Glaser que se basa en la comparación de los perfiles de saturación y de vapor de un corte constructivo formado por diferentes capas de materiales en un clima determinado. Es así que los perfiles dependerán de las presiones de vapor y saturación dadas en el clima para cada material según sean sus propiedades. A continuación se presenta un cuadro con las propiedades de materiales, símbolos y valores de diseño especificados en NCh1973:2014:

Tabla N° 11: Propiedades materiales, símbolos y valores de diseño (NCh1973:2014)

Propiedad	Símbolo	Valores de diseño
Conductividad térmica	λ	Se obtienen o determinan de acuerdo con NCh853 o ISO 10456, según corresponda.
Resistencia térmica	R	
Factor de resistencia al vapor de agua	μ	Se obtienen a partir de ISO 10456 o se determinan de acuerdo con ISO 12572.
Espesor de la capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua	s_d	

Cálculo de temperatura superficial para evitar la humedad superficial crítica

Esta norma establece un método para diseñar una envolvente de la edificación para prevenir los efectos adversos de la humedad superficial crítica, por ejemplo, formación de moho.

Existe un riesgo de formación de moho cuando las humedades relativas superficiales medias mensuales están sobre una humedad relativa crítica $\varphi_{si\ cr}$ la cual se debería considerar como 0,8 a menos que esté disponible información más específica.

El resultado obtenido deberá ser cumplido por todas las secciones que componen los sistemas constructivos.

Parámetros determinantes:

Además del clima exterior (temperatura del aire y humedad), tres parámetros dominan la condensación superficial y la formación de moho:

- a) La calidad térmica de cada elemento envolvente de la edificación, representada por la resistencia térmica, puentes térmicos, geometría y resistencia superficial interior. La calidad térmica se puede caracterizar por el factor de temperatura en la superficie interior f_{Rsi} ;
- b) El incremento de humedad interior
- c) La temperatura del aire interior y el sistema de calefacción, además de su configuración.

Diseño para evitar la formación de moho, corrosión u otro daño por humedad

Para evitar la formación de moho la humedad relativa media mensual en la superficie no debería superar la humedad relativa crítica $\varphi_{si\ cr}$, la cual se debería considerar como 0,8 a menos que esté disponible información más específica. Si es apropiado, se pueden utilizar otros criterios para evitar la corrosión, por ejemplo $\varphi_{si\ cr} < 0,6$.

Los pasos principales en el procedimiento de diseño son determinar la humedad del aire interior y luego, en base a la humedad relativa necesaria en la superficie, calcular la humedad de saturación aceptable por volumen, v_{sat} , o presión de vapor, p_{sat} , en la superficie. A partir de este valor, se establece la temperatura superficial mínima y por lo tanto la calidad térmica necesaria de la envolvente de la edificación (para una temperatura del aire interior, expresada por f_{Rsi}).

Para cada mes del año, se deben seguir los pasos siguientes:

- a) Definir la temperatura exterior según el punto de la normativa 4.2.3;

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

- b) Definir la humedad exterior según el punto de la normativa 4.2.4;
- c) Definir la temperatura interior según el tipo y uso previsto del edificio;
- d) Usar el procedimiento definido en la normativa punto 4.3.2 para obtener la humedad relativa interior;
- e) Con una humedad relativa máxima aceptable en la superficie, $\varphi_{si} = \varphi_{si\ cr}$, calcular la presión de vapor de saturación mínima aceptable, p_{sat} :

$$p_{sat}(\theta_{si}) = \frac{p_i}{\phi_{sicr}}$$

- f) Determinar la temperatura superficial mínima aceptable, $\theta_{si,min}$, a partir de la presión de vapor de saturación mínima aceptable calculada.
- g) A partir de la temperatura superficial mínima aceptable, $\theta_{si,min}$, adoptando una temperatura del aire interior θ_i , y una temperatura exterior, θ_e , el factor de temperatura mínimo, $f_{Rsi,min}$, se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

El mes con el valor de $f_{Rsi,min}$ más alto es el mes crítico. El factor de temperatura para este mes es $f_{Rsi,máx}$, y el elemento de construcción se debe diseñar de modo que siempre se supere $f_{Rsi,máx}$, es decir $f_{Rsi} > f_{Rsi,máx}$

Para un diseño de edificación dado, se pueden deducir los valores eficaces de f_{Rsi} :

- Para elementos planos, a partir de $f_{Rsi} = 1 - R_{si} \times U$
- Cuando ocurren flujos de calor multidimensionales, a partir de un programa de elementos finitos similar de acuerdo con ISO 10211.

Diseño para la limitación de la condensación superficial en elementos de baja inercia térmica

La evaluación de la condensación superficial en elementos de baja inercia térmica tales como, por ejemplo, ventanas y sus marcos, los que muestran una rápida respuesta a los cambios de temperatura requiere un procedimiento distinto.

La condensación en la superficie interior de los marcos de ventana puede ser un inconveniente si el agua corre sobre las decoraciones adyacentes, y puede causar corrosión en los marcos metálicos o pudrición en los de madera debido a las juntas permeables, por ejemplo, entre el marco y el vidrio.

Debido a sus superficies de terminación impermeables, la formación de moho rara vez es un problema en los marcos de ventana. La humedad relativa máxima aceptable en la superficie del marco es por lo tanto $\varphi_{si}=1$.

Algo de condensación intermitente en los marcos de ventana puede ser aceptable, sin embargo, limitará esto el procedimientos siguientes:

- a) Definir la temperatura exterior como el promedio, tomado sobre varios años de la temperatura media diaria más baja para cada año.
- b) Definir la temperatura interior de acuerdo a la práctica nacional.
- c) Utilizar el procedimiento para obtener la humedad relativa interior según como lo muestra el punto 4.3. de esta norma.
- d) Con una humedad relativa máxima aceptable en la superficie interior $\varphi_{si}=1$, calcular la presión de vapor mínima aceptable p_{sat} :

$$p_{sat}(\theta_{si}) = p_i$$

- e) Determinar la temperatura superficial mínima aceptable, $\theta_{si,min}$, a partir de la presión de vapor de saturación mínima aceptable.

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

- f) A partir de la temperatura superficial mínima aceptable, $\theta_{si,min}$, adoptando una temperatura del aire interior θ_i , (según punto 4.3.1 de la norma) y una temperatura exterior, θ_e , se calcula el factor de temperatura necesario del elemento de construcción $f_{Rsi, min}$, de acuerdo a ecuación xxx

Debido a la forma compleja y variedad de materiales utilizados en los marcos de ventanas y las interacciones entre el vidrio, el marco y la pared que contiene la ventana, los flujos de calor y las temperaturas superficiales generalmente no se pueden calcular por métodos simples de una dimensión.

Por lo tanto, se necesita tener cuidado al calcular la temperatura superficial mínima aceptable del marco con las temperaturas del aire interior y exterior.

Los cálculos por elementos finitos con dos o, si es necesario, tres dimensiones sobre sistemas de ventanas completas, incluyendo vidriado, proporcionan temperaturas superficiales que se pueden correlacionar con cualquier combinación de temperaturas interiores o exteriores. Los cálculos realizados con un material aislante, tal como poliestireno expandido, que sustituya a vidrio y que se utiliza para obtener una transmitancia térmica equivalente del marco, no proporciona temperaturas superficiales exactas.

En ISO 10077-2 se presentan detalles de métodos de cálculo apropiados.

Se han desarrollado diversos métodos simplificados para permitir el cálculo de transmitancias térmicas realistas de ventanas completas que considera flujos de calor multidimensionales a través del marco y el espacio entre los paneles de doble vidriado. Aunque éstos darán flujos de calor exactos, las temperaturas superficiales serán erróneas y nos e deberían utilizar para estimar el riesgo de condensación.

Esta normativa también explica la metodología de cálculo de condensaciones intersticiales que no se revisarán en detalle en esta investigación.

3.1.3. Aplicación NCh1973:2014

Para la aplicación de los PDA, la DITEC del MINVU ha desarrollado fichas y herramientas de cálculo que faciliten el diseño y aplicación de los requerimientos de eficiencia energética estipulados en cada PDA.

La planilla referida al cálculo de condensaciones según la normativa descrita, establece el siguiente procedimiento para el cálculo de condensaciones:

1. Se debe verificar la disminución del riesgo de condensación superficial e intersticial, comparando los resultados del cálculo de la solución constructiva original o base y la solución constructiva proyectada.
2. Se realiza el análisis en el mes más desfavorable del año, en julio, en dos secciones del sistema constructivo; la sección más favorable (aislante térmico) y la más desfavorable (estructura).
3. Parámetros climáticos para el cálculo:
 - 3.1 Temperatura interior: (definida en la planilla según selección de provincia)
 - 3.2 Temperatura exterior: (media mínima mensual de la provincia seleccionada del mes de Julio, definida)
 - 3.3 Humedad relativa interior: se deben evaluar tres escenarios para cada análisis: 65%, 75% y 80% (definida)
 - 3.4 Humedad relativa exterior: (asociada a la temperatura exterior de la provincia seleccionada en el mes de Julio)
4. Propiedades de los materiales:
 - 4.1 Permeabilidad al vapor de agua: según anexo materiales definido por DITEC o según informe de ensayo conforme a NCh 2457 o según biblioteca de materiales de la misma planilla de cálculo de la DITEC.
 - 4.2 Conductividad térmica: según listado tabla A.1 NCh 853 o certificado de ensayo oficial según NCh 850.
 - 4.3 Resistencia térmica: según cálculo definido en NCh 853.
5. Se analiza el riesgo de condensación superficial considerando la resistencia térmica de los materiales, flujo de calor y parámetros climáticos.

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

6. Se analiza el riesgo de condensación intersticial considerando las capas de materiales con sus resistencias térmicas, espesores y permeabilidad al vapor de agua.
7. Según los resultados de los análisis de cada elemento, sección y escenario se determinan las soluciones proyectadas para disminuir el riesgo de condensación superficial e intersticial
8. Para cada sección y caso analizado la planilla entrega en el apartado RESULTADOS el resultado detallado de la condensación superficial o intersticial además de la conclusión respecto a la disminución del riesgo de condensaciones.

Se entiende que las consideraciones y criterios de NCh 1973 y definiciones del Minvu, corresponden a cálculos simplificados, que consideran el transporte de humedad solamente mediante la difusión de vapor, dejando de lado las características de absorción de los materiales y otros factores físicos.

Las consideraciones climáticas también son definidas solo para el mes más crítico y de manera estacionaria, asumiendo los promedios de humedad relativa y temperatura exterior, además de ajustar las mediciones a cada provincia en general, sin que existan diferencias entre ciudades de la misma provincia.

3.1.4. ESTÁNDAR PLAN DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Debido a la contaminación atmosférica del aire, el 10 de enero de 2013 el Ministerio del Medio Ambiente declaró Zona Saturada por material particulado fino respirable MP2,5, como concentración diaria, a las comunas de Temuco y Padre Las Casas. Esta declaración permite al Estado de Chile desarrollar e implementar un instrumento de gestión ambiental que tiene por finalidad recuperar los niveles señalados en las normas de calidad de aire ambiental de una zona saturada. A partir de esta declaración, se dicta el Plan de Descontaminación Atmosférica de Temuco y Padre Las Casas el 17 de noviembre de 2015.

Dentro de las líneas de acción del plan se encuentra la regulación referida al mejoramiento de la eficiencia térmica de la vivienda, la cual establece un nuevo estándar sobre la actual reglamentación térmica (O.G.U.C.). Esta modificación se basa principalmente en la propuesta de la NTM11 en el apartado de comportamiento higrotérmico, estableciendo nuevos requisitos que buscan que las viviendas consuman menos energía para calefaccionarse, disminuyendo así la utilización de leña.

En su aplicación los PDA tienen diferentes etapas y diferencia inicialmente las viviendas existentes que se adjudiquen un mejoramiento térmico de las viviendas nuevas. Los nuevos estándares de eficiencia energética que se deben cumplir son los siguientes:

- 1) Transmitancia térmica de la envolvente
- 2) Riesgo de condensación
- 3) Infiltraciones de aire
- 4) Ventilación
- 5) Control de ganancias solares y aislamiento térmico de sobrecimientos

Después del PDA de las comunas de Temuco y Padre Las Casas se establecieron nuevos PDA similares, en total hoy existen 13 PDA vigentes de los cuales 7 son similares al de Temuco y Padre Las Casas en relación a los requerimientos de eficiencia energética de vivienda nueva exigidos, por etapas; la mayoría de estos se ubica en la zona sur:

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

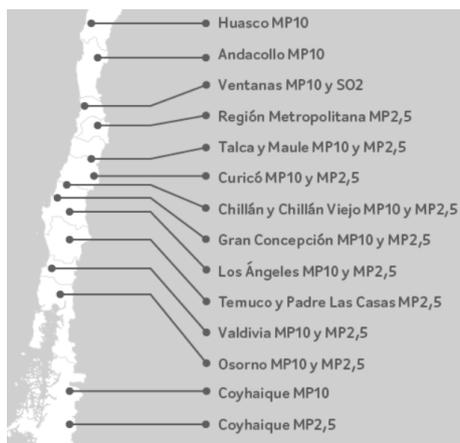


Figura N° 33: Planes de Descontaminación Atmosférica (mma.gov.cl,2019)

En la imagen también se puede observar el PDA de Gran Concepción, el cual si bien ya está preparado, no está aún vigente.

A continuación, como ejemplo de un tipo de PDA, se detalla el artículo N°33 del Plan de Descontaminación Atmosférica de las comunas de Temuco y Padre Las Casas, vigente para toda vivienda nueva desde el 1° de enero de 2018:

1. Transmitancia térmica de la envolvente:

Los proyectos de vivienda nueva deberán verificar el estándar que se señala en la siguiente tabla:

Tabla N° 12: Transmitancia térmica envolvente máxima PDA Temuco y Padre Las Casas

Elemento	Estándar	Valor U
Techo	Valor U (W/(m²K))	0,28
Muro		0,45
Piso Ventilado		0,50
Ventana		3,60
Puerta		1,70

Para efectos de cumplir estos estándares, se podrá optar por alguna de las siguientes alternativas:

- a) Mediante la especificación y colocación de un material aislante térmico, incorporado o adosado al complejo de techumbre, al complejo de muro o al complejo de piso ventilado, cuyo R100 mínimo rotulado cumpla con los valores establecidos en la siguiente tabla:

b) Tabla N° 13: valor R100 mínimo PDA Temuco y Padre Las Casas

Elemento	Estándar	Valor R100
Techo	Valor R100 ((m²K)/W)x100	357
Muro		222
Piso Ventilado		200

- c) Mediante un Certificado de Ensaye en base a la Norma NCh851 y NCh3076 partes 1 y 2, según corresponda, otorgado por un laboratorio con inscripción vigente en el Registro Oficial de Laboratorios de Control Técnico de Calidad de la Construcción del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, demostrando el cumplimiento de la transmitancia o resistencia térmica total de la solución del complejo de techumbre, muro, piso ventilado, ventana y puerta.

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

- d) Mediante cálculo, el que deberá ser realizado de acuerdo a lo señalado en las normas NCh853, NCh3117 y NCh3137 partes 1 y 2, según corresponda, demostrando el cumplimiento de la transmitancia o resistencia térmica total de la solución del complejo de techumbre, muro, piso ventilado, muro y puerta. Dicho cálculo deberá ser efectuado por un profesional competente.
 - e) Mediante una solución constructiva específica para el complejo de techumbre, muro y piso ventilado que corresponda a alguna de las soluciones inscritas en el Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico, confeccionado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Corresponderá al arquitecto informar la alternativa adoptada al solicitar el permiso de edificación.

2. Riesgo de condensación:

Las soluciones constructivas que se adopten deberán disminuir el riesgo de condensación superficial e intersticial.

En proyectos de vivienda nueva, el riesgo de condensaciones será acreditado por el proyectista para la obtención del permiso de edificación, mediante la norma de cálculo NCh1973, considerando los criterios de cálculo que el MINVU ha definido para ello.

3. Infiltraciones de aire:

Los proyectos de viviendas nuevas deberán verificar el estándar para la vivienda que se señala en la Tabla N° 22.

Tabla N° 14: Tabla N°22. Infiltraciones de aire máxima vivienda PDA Temuco y Padre Las Casas

Elemento	Estándar	Temuco Padre Las Casas
Vivienda	Clase de infiltración de aire a 50Pa (ach)	7

*ach: renovación del volumen de aire en la vivienda por hora.

Nota: El cumplimiento de la clase de infiltración de aire está referido principalmente a partidas de sellos de puertas y ventanas, sello de uniones en encuentros entre distintos elementos, sello de canalizaciones y perforaciones de instalaciones.

Asimismo, las puertas y ventanas deberán cumplir con el grado de estanqueidad al viento indicado en la Tabla N° 23.

Tabla N° 15: Tabla N°23. Grado de estanqueidad al viento puertas y ventanas PDA Temuco y Padre Las Casas

Elemento	Estándar	Temuco Padre Las Casas
Puerta y ventana	Grado de estanqueidad al viento a 100 Pa (m³/h m²)	10

Para efectos de cumplir los estándares señalados en las tablas precedentes, se podrá optar por alguna de las siguientes alternativas:

- a) Mediante un Certificado de Ensaye otorgado por un laboratorio con inscripción vigente en el Registro Oficial de Laboratorios de Control Técnico de Calidad de la Construcción del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, efectuado a una vivienda o una muestra representativa de un conjunto de viviendas, en terreno, en base a las Normas NCh3296 y NCh3297, según corresponda, y conforme al procedimiento de muestreo que el referido Ministerio defina para ello.
- b) Para el estándar de infiltración de aire y a falta de laboratorios acreditados en la certificación de ensaye de dicho estándar, éste podrá cumplirse mediante Especificaciones Técnicas Mínimas. Esta alternativa

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

dejará de estar permitida cuando el Ministerio de Vivienda y Urbanismo así lo establezca, mediante el correspondiente acto administrativo.

Corresponderá al arquitecto informar la alternativa adoptada al solicitar el permiso de edificación.

4. Ventilación:

Las viviendas deberán contar con un sistema de ventilación que garantice la calidad de aire interior.

En proyectos de vivienda nueva, el proyecto de ventilación deberá ser presentado por el proyectista para la obtención del permiso de edificación, diseñado en base a las Normas NCh3308 y NCh3309, según corresponda. El sistema de ventilación deberá considerar sistemas mecánicos de salida del aire al exterior, pudiendo ser las entradas de aire natural o mecánica, con al menos dos puntos de extracción de aire ubicados en baño y cocina con encendido mediante control de higrostató.

5. Control de ganancias solares y aislamiento térmico de sobrecimientos:

Los proyectos de vivienda nueva deberán cumplir exigencias respecto del control de las ganancias solares a través de vanos traslúcidos o transparentes y exigencias de aislación térmica de sobrecimiento, para pisos en contacto con el terreno natural, las que serán establecidas por MINVU mediante acto administrativo.

3.1.5. ALCANCE DE LA APLICACIÓN DE LOS ESTÁNDARES EN OTRAS NORMATIVAS Y DECRETOS

La nueva reglamentación térmica NTM11 no tiene aún fecha de aplicación, sin embargo ya se están utilizando parte de esta normativa, tanto en los PDA ya mencionados, como en decretos y concursos licitados por el estado.

Un ejemplo de eso son los decretos DS19, PPPF y DS49 donde se solicita el cumplimiento de la empresa oferente de ciertos aspectos de eficiencia energética, algunos particulares y otros basados en la NTM11.

Estos instrumentos principalmente se enfocan en la inclusión de un sistema de ventilación, estudio de riesgo de condensaciones que demuestren la disminución de las mismas y aumento de la resistencia térmica.

El detalle de cada uno de estas normativas y decretos se adjunta en el anexo 1.

3.2. NORMATIVA RELACIONADA EN ALEMANIA**3.2.1. DIN 4108-3:2014**

La mencionada normativa es la parte 3 de la norma DIN 4108 denominada "Protección térmica y ahorro energético en edificios". Esta tercera parte hace referencia a la "Protección contra la humedad relacionada con el clima – Exigencias, métodos de cálculo y directrices para la planificación y ejecución" y especifica lo relacionado con la formación de condensaciones y su cálculo.

1.2.1.1. Prevención de la humedad ambiental crítica en la superficie de los elementos y formación de condensación intersticial en el interior de los elementos**1.2.1.1.1. Humedad crítica sobre la superficie de los elementos**

Se considera que se han cumplido los requisitos para evitar la humedad crítica de las superficies de los componentes, para el método estacionario, si no se alcanza o supera la humedad relativa en las superficies de la habitación, que es decisiva para los efectos críticos o perjudiciales de la superficie. Se consideran los siguientes valores críticos para la humedad relativa de las superficies:

a) Para formación de condensación $\varphi_{si,cr}=1$ (correspondiente a 100% de humedad relativa)

b) Para formación de condensación $\varphi_{si,cr}=0,8$ (correspondiente a 80% de humedad relativa)

*Existen otras exigencias relacionadas por ejemplo con la corrosión de materiales metálicos.

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

La temperatura superficial mínima θ_{si} depende de las condiciones climáticas según la siguiente igualdad:

$$p_{\text{sat}}(\theta_{\text{si,min}}) = \frac{p_i}{\varphi_{\text{si,cr}}} = \frac{\varphi_i}{\varphi_{\text{si,cr}}} \times p_{\text{sat}}(\theta_i)$$

$\theta_{\text{si,min}}$ se determina según anexo de esta norma. Dependerá también del factor de temperatura medido como valor de tamaño de la calidad de la protección térmica de una parte de la construcción determinada por las condiciones de borde de clima y de transmitancia térmica.

Para la determinación de la resistencia térmica del elemento constructivo se puede consultar en DIN EN ISO 6946 donde se muestran valores medidos según DIN 4108-4, DIN EN ISO 10456 o también se puede ver como especificación de producto o material.

Para consultar otra información relacionada con las condiciones de borde climáticas y de resistencia térmica y sus métodos de cálculo, se puede consultar en DIN EN ISO 13788, DIN EN ISO 6946 y DIN EN ISO 10211.

Por su parte, para el cálculo de condiciones de borde sobre puentes térmicos (elementos o zonas singulares) y los cálculos o mediciones para prevenir la formación de moho se debe consultar DIN 4108-2. Para otros complementos de cálculos de puentes térmicos se puede consultar DIN EN ISO 10211.

Planificación y ejemplos de aplicación para puentes térmicos se entregan en DIN 4108 complemento 2.

También se puede consultar DIN EN ISO 13788 para otros datos sobre prevención de humedad superficial crítica.

1.2.1.1.2. Condensación intersticial en el interior de los elementos

En época de invierno debido a las diferencias de presión entre el exterior e interior se pueden producir condensaciones sobre las superficies y al interior de estas, según sea las características de los materiales que componen el elemento constructivo en relación con el grado de permeabilidad al paso del vapor de agua. Los siguientes requisitos se refieren al descrito método de balance de periodo y no se deben entender como un modelo que entregue el real comportamiento de la temperatura y humedad en el elemento constructivo.

El siguiente método sobre un balance del periodo no es aplicable o apropiado a lo siguiente:

- Construcciones no calefaccionadas o con alta carga de humedad (piscinas por ejemplo)
- Elementos que limiten con el suelo
- Elementos que limiten con sótanos o recintos no calefaccionados
- Techos con tierra o jardines así como techos revestimientos de paneles cerámicos o rejillas de madera
- Aislación térmica interior con $R > 1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ sobre paredes exteriores con pronunciadas propiedades sorptivas y capilares;
- Para cálculos de secados naturales así como casos de datos de humedad en la obra gruesa o penetración de agua lluvia
- Construcciones de techos de madera no ventilados pero si aislados que cuenten con una cubierta de metal, sellado o Impermeabilización en encofrados o entarimados sin ventilación posterior a la impermeabilización de cubierta.

El método de balance de periodo es un modelo demostrado o valorado como medio de ayuda para técnicos en la evaluación de la protección de la humedad relacionada con las condiciones climáticas. No representa los procesos físicos reales ni la secuencia temporal real.

Requisitos a cumplir:

La formación de condensación intersticial al interior de los elementos que, al aumentar el contenido de humedad de los materiales y aislantes térmicos, provoque daños materiales o menoscabe la seguridad

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

funcional, se debe prevenir. Se considera inofensivo si se cumplen los requisitos esenciales, por ejemplo, aislamiento térmico y estabilidad. Esto se logra generalmente si se cumplen las condiciones enumeradas en las letras a) a d):

- a) Los materiales de construcción que entran en contacto con la condensación no deben ser dañados (por ejemplo, por corrosión, ataque de hongos);
- b) La humedad absorbida debe poder secarse durante los periodos de secado, esto significa: $M_c \leq M_{ev}$;
- c) En techos y muros que limitan con el exterior así como cielos bajo techos ventilados, deben en promedio de la sección constructiva un máximo de masa de agua de condensación M_c de total 1,0kg/m² (general) así como no exceder 0,5 kg/m² (sobre las superficies de contacto de las capas, de las cuales al menos una no absorbe agua de manera capilar). Para elementos constructivos de manera existe una reserva de agua calculada (ver DIN 68800-2)
- d) Para maderas existe una cantidad de masa de humedad elevada u , alrededor de 5%, en materiales compuestos de madera más del 3%. Esos límites no son válidos para paneles livianos de fibra de madera y paneles de múltiples capas según DIN EN 13168.

El cálculo de la masa de condensación intersticial y evaporación debida a la difusión se realizará de conformidad con el anexo A. La condensación inducida por convección debe ser minimizada por a través de medidas que mejoren la hermeticidad.

En la norma DIN 4108-7 se pueden encontrar ejemplos de aplicación de construcciones tipo.

Si se produce condensación y acumulación de agua en varias capas, se debe sumar el total de masa de agua de condensación M_c para compararla con los requerimientos a cumplir mencionados.

Los resultados del cálculo pueden ser los siguientes:

- a) No se produce formación de condensación intersticial. En este caso, se indicará que el componente está exento de condensación en su interior.
- b) Se produce condensación intersticial en una o más capas. En este caso, las masas de agua de condensación que se producen en los límites de las capas deben indicarse individualmente, además de su suma total. También debe comprobarse y anotarse si se cumplen los requisitos del punto 5.2.2.
- c) La formación de condensación intersticial se forma en un área específica. En este caso, debe especificarse la masa de condensación que se produce en la zona. Además, se comprobará y anotará si se cumplen los requisitos del punto 5.2.2.
- d) La formación de condensación intersticial se forma en más de un área específica, en ese caso se debe proceder igual que el caso b).

Para la evaluación de los resultados se aplica lo siguiente:

- Si no se forma condensación intersticial o si se cumplen los requisitos mencionados, entonces el elemento es técnicamente permitido en relación a la difusión.
- Si se forma condensación intersticial o si no se cumplen los requisitos mencionados, entonces el elemento no es técnicamente permitido en relación a la difusión.

1.2.1.1.3. Elementos sobre los que no funciona el método de cálculo de condensación intersticial

Para los componentes que se enumeran a continuación con suficiente aislamiento térmico según DIN 4108-2 y diseño hermético según DIN 4108-7 para habitaciones residenciales no climatizadas o habitaciones utilizadas para fines similares, no se requiere ninguna prueba matemática de no formación de condensación intersticial debido a la difusión de vapor de agua, ya que no hay riesgo de condensación de agua o bien el procedimiento de balance de período no es adecuado para la evaluación.

Para el caso de conservación de elementos constructivos de madera aplica en todo caso la norma DIN 68800-2.

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE**Muros exteriores de hormigón o albañilería:**

Paredes de mampostería según DIN EN 1996-1-1, paredes de hormigón normal según DIN EN 206 o DIN 1045-2, paredes de hormigón aligerado microestructurado según DIN 1045-2, DIN EN 206 y DIN EN 1992-1-1, paredes de hormigón aligerado poroso según DIN 4213, DIN EN 992 y DIN EN 1520, cada una de ellas con revoque interior y una de las siguientes capas exteriores:

- Enlucido exterior hidrófugo según;
- Aislamiento exterior según DIN 4108-10 o enlucido aislante térmico hidrófugo según tabla 4 o mediante un sistema de aislamiento térmico compuesto normalizado según DIN EN 13499 o DIN EN 13500;
- Albañilería de fachada según DIN EN 1996-1-1;
- Revestimientos de paredes exteriores recubiertos con mortero según DIN 18515-1 con un contenido de juntas de al menos un 5 %;
- Revestimientos de paredes exteriores ventiladas según DIN 18516-1 con y sin aislamiento térmico;
- Revestimientos de paredes exteriores ventiladas de un solo lado con una abertura de ventilación de 100 cm²/m.

Muros con aislación interior:

Paredes sin carga de lluvia, como en el punto anterior, con una resistencia térmica del aislamiento interior de $R \leq 0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$. En el caso de una resistencia térmica de la capa de aislamiento térmico de $0,5 < R \leq 1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ se tiene un valor de $S_{d,i} \geq 0,5 \text{ m}$ de la capa de aislamiento térmico, incluyendo el revestimiento en el lado de la habitación; debe evitarse la entrada de aire de la habitación en el interior o detrás del aislamiento interior mediante medidas adecuadas.

Muros de madera

Se deberán regir según DIN 68800-2 y no regirá el método de evaluación de balance del periodo en los casos que por ejemplo se tengan capas con valores $S_{d,i} \geq 2,0 \text{ m}$ u otros que se combinen con sistemas por ejemplo de aislación exterior. Los cuales se deberán regir según normativas específicas de cada caso.

Otros casos:

- Paredes de estructura de madera con una capa hermética en el lado de la habitación
- Muros de sótanos que limiten con el terreno natural
- Pisos con aislación térmica perimetral
- Techos sin capa de ventilación bajo cubierta
- Techos con capa de ventilación pero con pendiente $< 5^\circ$ y capa hermética de máximo 10m
- Techos con pendiente $\geq 5^\circ$ y valor $S_{d,i}$ de al menos 2m

1.2.1.2. Protección contra luvias de muros

La penetración de lluvia en muros es causada por lluvia y viento simultáneo. Esta agua de lluvia puede ser absorbida por los materiales del muro como efecto de una succión capilar de la superficie o directamente penetrar en la estructura a través de grietas, huecos o sellos defectuosos, por ejemplo, como resultado de la presión dinámica. La liberación necesaria del agua absorbida por evaporación puede reducirse con medidas constructivas, o mediante revoques o revestimientos. Las medidas a tomar dependerán de la intensidad de las luvias. La presión ejercida por el viento y las precipitaciones, así como por la ubicación de la fachada, altura y tipo de edificio.

Se diferencian 3 zonas en Alemania donde se diferencian según la intensidad de las luvias, se clasifican en zona de baja, media y fuerte intensidad de luvias.

Más detalles de esta parte de la normativa no se entregará ya que escapa del tema principal de esta investigación.

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

1.2.1.3. Indicaciones sobre hermeticidad al aire

La envolvente de la construcción debe ser hermética al aire para evitar que el aire que entre arrastre humedad hacia el interior de la habitación, ya que esto puede provocar formación de condensación en la estructura. Esto también aplica a los encuentros muro/techo, chimenea-techo u otras y a las instalaciones y otras piezas empotradas.

Se debe evitar también el intercambio de aire entre salas expuestas a diferentes radiaciones solares (por ejemplo desde el ático), a través de sellado de estas zonas. Para la estanqueidad de los elementos se debe considerar la norma DIN 4108-7.

1.2.1.4. Anexo: Método de cálculo para la prevención de humedad crítica sobre la superficie de los elementos

Para evitar valores críticos de humedad superficial de acuerdo con lo ya descrito, debe garantizarse que se mantenga una resistencia térmica suficiente del elemento. El aislamiento térmico requerido resulta del valor mínimo crítico resultante para la temperatura de la superficial de la habitación, que viene determinado por la temperatura y la humedad relativa del aire de la habitación, así como por el valor crítico de la humedad relativa en la superficie del elemento.

El valor mínimo requerido de la temperatura en la superficie de los componentes de la habitación siempre se puede determinar de la siguiente manera puede calcularse según la ecuación:

$$\theta_{si,min} = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{p_{sat,si}}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p_{sat,si}}{610,5}\right)}$$

Con:

$$p_{sat,si} = \frac{\varphi_i}{\varphi_{si,cr}} p_{sat,i} = \frac{p_i}{\varphi_{si,cr}}$$

Donde:

$\theta_{si,min}$ es el valor mínimo de temperatura superficial al interior de la habitación, en °C;

$p_{sat,si}$ es la presión estática para la temperatura superficial interior mínima crítica, en Pa;

$p_{sat,i}$ es la presión estática para la temperatura ambiental interior, en Pa;

φ_i Humedad relativa ambiental interior, en %

p_i Presión de vapor de agua del aire interior, en Pa;

$\varphi_{si,cr}$ Humedad relativa superficial interior crítica, en %

Ecuación válida para valores de temperatura sobre 0°C y para presión de vapor de agua sobre 610,5Pa.

El valor mínimo necesario de la temperatura de la superficie de la habitación para mantener un determinado valor máximo crítico de la humedad relativa en la superficie de la habitación también puede determinarse aproximadamente con la ayuda de las tablas A.1 y A.2 en función de las condiciones climáticas de la habitación o de la presión parcial de vapor de agua del aire de la habitación y de la humedad relativa crítica en la superficie.

Por lo que se refiere al método de cálculo para el cálculo del aislamiento térmico requerido, hay que distinguir entre componentes planos y térmicamente homogéneos y componentes singulares como los puentes térmicos geométricos o constructivos.

Cálculo en la sección homogénea del elemento:

La formación de condensación y moho en la superficie interior de componentes planos y térmicamente homogéneos se evita en salas de uso común si se cumplen los requisitos mínimos de aislamiento térmico para componentes sólidos o ligeros según DIN 4108-2.

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

Diferenciándose según sean las condiciones climáticas normalizadas subyacentes, deberán determinarse los valores mínimos de las temperaturas superficiales en la habitación de acuerdo con el punto anterior. Los valores según ecuación $\varphi_{si,cr} = 1$ así como $\varphi_{si,cr} = 0,8$ o según otras condiciones, pueden utilizarse como valores críticos para la humedad relativa en las superficies de la habitación para evitar la condensación, el moho u otros efectos.

La resistencia térmica mínima requerida R_{min} de un componente plano, térmicamente homogéneo sin puentes térmicos para evitar la humedad crítica en la superficie interior se determina según la ecuación siguiente:

$$R_{min} = \frac{R_{si}}{1 - f_{Rsi,min}} - (R_{si} + R_{se})$$

Con:

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Donde:

$\theta_{si,min}$ Temperatura superficial interior mínima

$f_{Rsi,min}$ Factor de temperatura calculado para la superficie interior

R_{si} , R_{se} Resistencia térmica superficial interior y exterior

Suponiendo las condiciones climáticas límite normalizadas, tal y como se toman como base en la norma DIN 4108-2 para la prueba para evitar la formación de hongos de moho en el área de puentes térmicos, se obtienen los siguientes factores de temperatura de dimensionamiento como valores límite para la superficie de la habitación, con el fin de evitar diferentes condiciones críticas de humedad del aire en las superficies de los componentes de la habitación:

$f_{Rsi,min} = 0,57$ Para prevención de formación de condensación intersticial (con $\varphi_{si,cr} = 1$; correspondiente a 100% de humedad relativa)

$f_{Rsi,min} = 0,70$ Para prevención de formación de moho (con $\varphi_{si,cr} = 0,8$; correspondiente a 80% de humedad relativa)

$f_{Rsi,min} = 0,88$ Como ejemplo de prevención de corrosión de un material en específico (para el ejemplo con $\varphi_{si,cr} = 0,6$; correspondiente a 60% de humedad relativa)

Cálculo en la parte singular del elemento o puente térmico:

Para el cálculo del valor mínimo requerido de la temperatura superficial de la habitación en relación con la formación de hongos de moho en el área de puentes térmicos, se especifican las condiciones de contorno relevantes en la norma DIN 4108-2. Para el cálculo de otras temperaturas superficiales críticas, por ejemplo, en relación con el agua de condensación o la corrosión, el procedimiento será análogo.

A diferencia de los componentes térmicamente homogéneos, la temperatura de la superficie de la habitación para el punto más desfavorable de la zona térmica del puente con las condiciones límite especificadas en la norma DIN 4108-2 debe determinarse de acuerdo con procedimientos especiales para el cálculo del puente térmico (véase también la norma DIN EN ISO 10211) con el fin de formar el factor de temperatura f_{Rsi} y compararlo con los factores de temperatura de dimensionamiento $f_{Rsi,min}$, dependiendo del caso crítico que deba tenerse en cuenta, p. ej., $f_{Rsi,min} = 0,7$, con el fin de evitar la formación de moho de acuerdo con la norma DIN 4108-2. Si es necesario, se debe mejorar el diseño en el área del puente térmico para que se mantenga el factor de temperatura de diseño.

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

Este anexo también especifica el procedimiento de cálculo de condensaciones intersticiales el cual no se revisará por no formar parte de esta investigación.

3.2.2. DIN 4108-8:2010

Al igual que la norma anterior, esta parte 8 forma parte de la norma DIN 4108, esta octava parte hace referencia específicamente a “Prevención del crecimiento de moho en edificios residenciales” y como se especifica, se enfoca en la formación de moho en edificios residenciales, su origen, causas y métodos de prevención de crecimiento.

Supone que el uso es habitual o similar a la vivienda, en particular con respecto a las temperaturas internas y las cargas de humedad.

Esta norma técnica también proporciona orientación sobre la planificación y el uso de los sistemas de calefacción y ventilación. El objetivo es apoyar la prevención y el control de las condiciones de vida de los moho respetando al mismo tiempo los contextos físicos del edificio.

Esta norma considera dentro de los 200 tipos de moho que existen, las siguientes especies como indicador de daño por humedad de importancia:

Tabla N° 16: Especies consideradas en la norma.

1 <i>Acremonium</i>	6 <i>Phialophora</i>
2 <i>Aspergillus penicillioides</i>	7 <i>Scopulariopsis brevicaulis</i>
3 <i>Aspergillus restrictus</i>	8 <i>Scopulariopsis fusca</i>
4 <i>Chaetomium</i>	9 <i>Stachybotrys chartarum</i>
5 <i>Engyodontium (Tritirachium) album</i>	10 <i>Trichoderma</i>

La primera identificación que realiza esta norma es la asociación de la aparición de ciertas especies con las siguientes causas o fuentes:

- Presencia de plantas y vegetales: *Cladosporium herbarum*, *Alternaria alternata*, *Botrytis cinerea*
- Compost, material descompuesto, material derivado de las plantas: *Aspergillus fumigatus*
- Presencia de elementos perecederos, basura y bio basura: *varios tipos de Penicillium*
- Humedad ambiental alta y materiales con contenido de celulosa: *Stachybotrys chartarum*, *Chaetomium*, *Acremonium*
- Revestimiento húmedo con componente orgánico: *Phialophora*, *Engyodontium album*, *Scopulariopsis*
- Materiales con contenido de celulosa y humedad relativamente alta: *Aspergillus penicillioides*, *Aspergillus restrictus*, *Eurotium*, *Wallemia sebi*
- Cuero húmedo (zapatos u otros) o cría de animales: *Eurotium*
- Lugares habitados por animales: *Wallemia sebi*, *Eurotium*

Esta normativa se preocupa de que el diseño de la envolvente cumpla con una temperatura superficial interior mínima que evite las condensaciones por lo que define como requisito que se cumpla el diseño de la envolvente térmica según DIN 4108-2 (parte 2) que es la única normativa actualmente de carácter obligatoria en Alemania. Esta normativa establece un mínimo de resistencia térmica para el elemento de la envolvente.

Puentes térmicos:

La norma mencionada también tiene en cuenta la optimización de puentes térmicos que permitan obtener temperaturas interiores superficiales adecuadas. Normalmente estos puentes térmicos son la parte crítica de la envolvente térmica de la construcción. El cálculo de esto puede demostrarse mediante:

1. DIN 4108 Anexo 2.
2. Catálogos de puentes térmicos, según las condiciones de borde establecidas en DIN 4108-2.
3. Cálculo de puente térmico bidimensional con las condiciones de borde establecidas en DIN 4108-2.

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

Resistencia térmica:

La presente normativa supone el cumplimiento de la transmitancia térmica establecida específicamente en DIN 4108-2:2003-07 Sección 6.

Las resistencias superficiales consideradas podrían variar dependiendo del espacio donde se sitúa la cara exterior e interior de los muros perimetrales. Para un muro despejado la normativa indica una resistencia superficial interior $R_{si}=0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Cuando existen muebles apegados al muro exterior se define una resistencia superficial equivalente la cual provoca una disminución de la temperatura superficial interior (del muro). Se definen las siguientes resistencias superficiales equivalentes:

1. Mueble construido in situ, que forma parte de la construcción: $R_{si,eq} = 1,00 \text{ m}^2\text{K/W}$
2. Mueble fijo apegado al muro: $R_{si,eq} = 0,50 \text{ m}^2\text{K/W}$

Por ejemplo, un muro que cumpla la resistencia térmica mínima de DIN4108-2, reduciría su temperatura con un mueble construido in situ, de $15,8^\circ\text{C}$ a $8,8^\circ\text{C}$.

Temperatura superficial de la parte regular del elemento:

El cálculo de la transmitancia térmica del elemento se debe calcular según DIN EN ISO 6946.

La temperatura superficial de una parte homogénea de la construcción se define de la siguiente manera:

$$\theta_{si} = \theta_i - \frac{R_{si}}{R_{si} + \sum R + R_{se}} \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

Donde:

θ_{si} : Temperatura superficial interior

R_{si} : Resistencia superficial interior, según DIN EN ISO 6946

R_{se} : Resistencia superficial exterior, según DIN EN ISO 6946

$\sum R$: Suma de las resistencias térmicas de las capas que conforman el elemento

θ_i : Temperatura ambiental interior

θ_e : Temperatura ambiental exterior

La temperatura superficial interior de elementos no homogéneos se deberá calcular con DIN EN ISO 10211.

Para describir la temperatura superficial interior se define en DIN EN ISO 10211 el factor de temperatura f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Para evitar el crecimiento de moho se establece, dentro del enfoque climático de DIN 4108-2, una temperatura superficial interior mínima de $12,6^\circ\text{C}$. Para condiciones climáticas fijadas por la norma, el factor de temperatura correspondiente debe ser entonces $f_{Rsi} \geq 0,7$.

Para otras condiciones ambientales se define una temperatura superficial mínima para evitar el crecimiento de moho (basado en el criterio de 80% de DIN 4108-2, lo que significa una humedad de aire superficial de 80%) con la ayuda de la siguiente ecuación basada en la presión estática de vapor según DIN 4108-3:

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

$$\theta_{si} = 100 \cdot \left[\left(\frac{\phi}{0,8} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(b + \frac{\theta_i}{100} \right) - b \right]$$

Donde:

θ_{si} : Temperatura superficial interior

θ_i : Temperatura ambiental interior

ϕ : Humedad relativa interior, en número decimal

b, n : Constantes según DIN 4108-3:2001-07, Tabla A.3: $b = 1,098$ y $n = 8,02$ para $0^\circ\text{C} \leq \theta_i \leq 30^\circ\text{C}$ y $0^\circ\text{C} \leq \theta_{si} \leq 30^\circ\text{C}$

Temperatura superficial del puente térmico:

Los puentes térmicos se pueden calcular mediante cálculos directos u tabulados como referencia. Para uso general el factor de temperatura fR_{si} según su ecuación se utiliza para la posición con la temperatura superficial interior más baja. Cuanto mayor sea el valor de fR_{si} , menor será el riesgo de crecimiento de moho.

Temperatura superficial de ventanas, puertas ventanas y puertas:

Las ventanas, puerta ventanas y puertas son partes de la construcción con especial funcionalidad, de compleja geometría y de diversos materiales. Es por esto que se deben considerar en base a DIN 4108-2 y en cuanto a la disminución de formación de moho se debe referir a DIN EN 13788.

La resistencia superficial para una ventana, que se utilizará en el cálculo de la temperatura superficial interior, se debe considerar igual a 0,13 m²K/W.

El usuario:

El comportamiento del usuario es importante en la prevención de la formación de moho, específicamente a través de:

1. Evacuación de la humedad
2. Ventilar adecuadamente (a través de ventanas)
3. Calefaccionar adecuadamente
4. Posicionar adecuadamente los muebles (no apegados a muros exteriores)

Operación de la ventilación (apertura de ventanas)

La operación de la ventilación y el comportamiento del usuario frente a la ventilación de la vivienda influyen de manera determinante en:

Riesgo de crecimiento de moho

Calidad del ambiente interior

Consumo de energía de calefacción

La conducta del usuario frente a la operación de la ventilación y calefacción depende de 3 factores:

1. Factores climáticos
2. Estilo de vida
3. Circunstancias locales

La ventilación como protección del exceso de humedad (orientada a la prevención del crecimiento de moho) se describe en DIN 1946-6:2009-5 relacionada con la protección térmica y el tamaño de la vivienda. Una ecuación que permite dimensionar el volumen de caudal de aire exterior para cambio de aire se describe a continuación:

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

$$n = \frac{q_v}{V} = \frac{q_v}{A \cdot h}$$

Donde:

n : cambio de aire, en h-1

qv : caudal de aire exterior, en m3/h

V : Volumen del recinto, en m3

A : Superficie de la vivienda, en m2

h : la mitad de la altura del recinto, en m

A continuación se detallan algunas recomendaciones de ventilación:

Living comedor:

En general en el living se puede controlar de buena manera la humedad, sin embargo también se puede encontrar en este recinto una gran cantidad de plantas y otras fuentes de humedad (como el secado de ropa). Se deberá entonces de todas maneras ventilar regularmente estos recintos, al menos se debe ventilar cuando la calidad del aire sea mala, generando un golpe de ventilación que recambie el aire del recinto.

Cocina y baños:

En estos recintos se puede formar en corto tiempo mucha humedad (al cocinar, ducharse u otros). Esos máximos de humedad se deben eliminar rápidamente a través de la ventilación inmediata por ventanas. Un apoyo a la rápida eliminación de esta humedad es después de ducharse eliminar toda el agua de muros, posibles muebles, y pisos. No se debería permitir en el baño cortinas textiles ya que son acumuladores de humedad, pudiendo acelerar el riesgo de crecimiento de moho.

Dormitorios:

Cuando en invierno no se pueda mantener la ventana de dormitorios abierta, se podría recién abrir en la mañana pero generando un golpe de ventilación que cambie el aire del recinto. En la mañana se puede apagar la calefacción y en lo posible durante el día generar más golpes de ventilación, después de almuerzo o al comenzar la tarde ya se puede prender de nuevo la calefacción para que llegue a la temperatura deseada.

También se podría ventilar levemente de noche, el efecto de la baja de temperatura superficial ayudará también a secar los elementos de la construcción. El largo período de humedad crítica necesario para el crecimiento del moho se limita aún más al encontrarse el área local de la ventana más seca. Sin embargo si durante el día no se puede realizar el golpe de ventilación que recambie todo el aire del recinto, y humedad acumulada durante la noche, el crecimiento de moho puede ocurrir en las aletas y borde de la zona de la ventana refrigerada o más fría, dependiendo obviamente del clima interior y su sistema de calefacción.

En todos los casos, fuera de las pérdidas energéticas que conlleva, la ventilación permanente con el abatimiento vertical de la ventana o la utilización de celosías de ingreso de aire, constituyen la mejor prevención del crecimiento de moho en los componentes de la envolvente del edificio.

Subterráneos:

En los subterráneos (no habitados) las paredes exteriores en general tienen temperaturas superficiales bajas. En periodos de verano, especialmente en el periodo de transición al otoño, el aire entra en la bodega y puede provocar una formación de condensación en la pared fría y la consecuente formación de moho. Es útil ventilar una bodega húmeda en invierno ya que el aire es más seco. Una ventilación con aire seco de un subterráneo húmedo a menudo no es posible.

Humedad de construcción:

La humedad de los materiales presentes en una nueva construcción o en un mejoramiento pueden provocar problemas de humedad o condensación. Es decisivo cuánta humedad por ejemplo en el revestimiento existe. Naturalmente hay más humedad en construcciones húmedas que en construcción liviana o en seco.

La humedad se debe eliminar con una ventilación y calefacción intensiva de cada recinto de la construcción. En una construcción nueva masiva esto puede tardar cerca de 2 años. Durante ese tiempo se debe contar con un mayor consumo de energía de calefacción.

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

Ventilación y calefacción después de un mejoramiento de la vivienda:

Cuando se realizan mejoramientos se puede llegar a un estado crítico de la humedad. Por ejemplo cuando se mejoran las ventanas, aumentando la hermeticidad de la vivienda, pero no se mejora la envolvente térmica (en invierno con bajas temperaturas sobre el muro exterior). En estos casos las medidas de ventilación antes mencionadas pueden ser que no funcionen.

En esta situación se debe tener cuidado con los hábitos de ventilación y calefacción en las nuevas condiciones. En este caso se deberá ventilar y calefaccionar más y mayor tiempo. El usuario de la vivienda deberá informarse sobre el uso y operación de la ventilación y calefacción en una vivienda mejorada.

Prevención del secado de ropa dentro de la vivienda:

En una vivienda no se debe secar ropa, se debe usar para aquello los tendederos exteriores en la medida de lo posible. Si se cuenta con una habitación donde se seca ropa, se deberá abrir permanentemente una ventana, cerrar la puerta de esa habitación y no desconectar o reducir la calefacción.

Operación de la calefacción

La capacidad de absorción de agua del aire depende de la temperatura del aire (véase la Fig. 35). Si la temperatura del aire ambiente aumenta mientras el contenido de agua permanece igual, la humedad relativa del aire disminuye. Si por el contrario la temperatura ambiental se reduce, aumenta la humedad relativa del aire y aumenta el riesgo de crecimiento de moho con una mayor formación de esporas (véase la figura 36): La disminución de la temperatura del aire de 20 a 15 °C por ejemplo provoca un aumento de la humedad relativa del aire del 60 % al 80 % con una humedad absoluta constante.

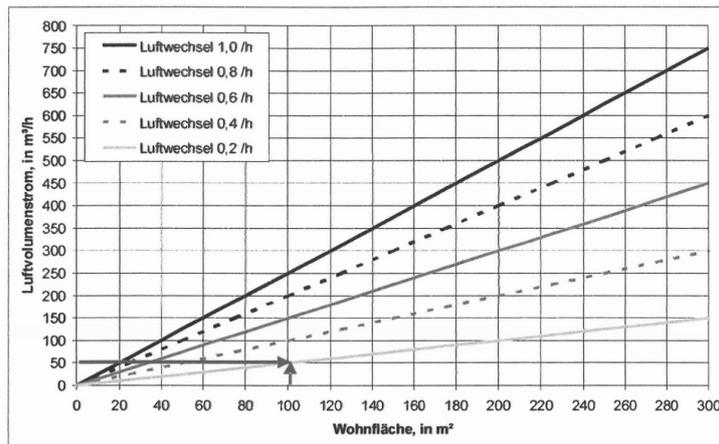


Figura N° 34: Ejemplo: cambio de aire resultante en relación con la superficie de la vivienda y el volumen de aire para ventilación continua (altura promedio de recinto de 2,50m) (DIN 4108-8:2010)

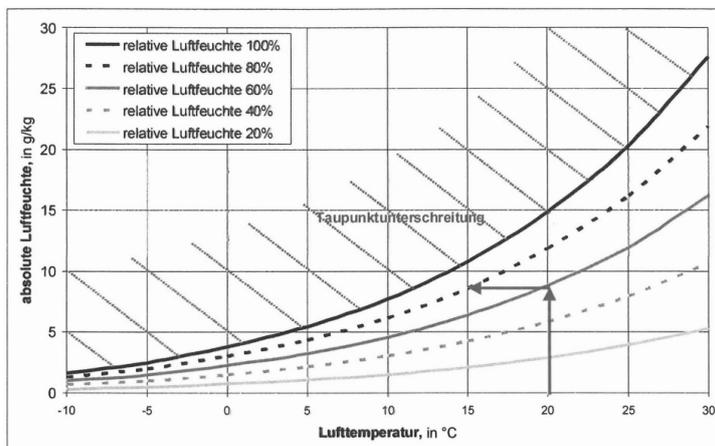


Figura N° 35: Humedad absoluta en relación con la temperatura ambiental (DIN 4108-8:2010)

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

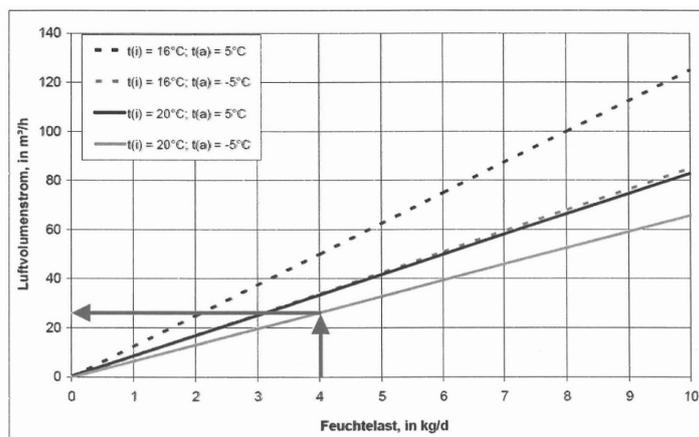


Bild 7 — Zusammenhang zwischen Feuchtelast, Raum- und Außenlufttemperatur sowie Luftvolumenstrom bei kontinuierlicher Lüftung nach DIN 1946:2009-05 (Ziel: Einhaltung von $\phi_{rel} \leq 80\%$ bei $\phi_{a} = 80\%$ und $f_{Rsi} = 0,70$ nach DIN 4108-2)

Figura N° 36: Esta figura puede utilizarse junto con las figuras 35 y 36 para sacar conclusiones sobre el contenido de humedad del edificio en relación con el uso de la vivienda y la liberación de humedad asociada al crecimiento de moho. La figura 35 también permite convertir el flujo volumétrico en un cambio de aire (DIN 4108-8:2010)

Ejemplo:

2 personas, secado de ropa dentro de la vivienda, según tabla 1 y figura 2: humedad absoluta promedio al día de 3,9kg/d, temperatura ambiental interior promedio de 20°C, temperatura ambiental exterior promedio de -5°C (según DIN 4108-2).

Desde la figura 37: caudal de ventilación continua de cerca de 40m³/h.

Superficie de 60m², desde imagen 5: cambio de aire continuo de cerca de 0,2h-1

Para lograr un comportamiento de calefacción que se adapte en gran medida a las condiciones requeridas, la información a los usuarios (especialmente cuando cambian de arrendatario) es de gran importancia.

Para una correcta calefacción se puede contar con las siguientes recomendaciones:

- No calefaccionar los pasillos o áreas no habitables: Mantener puertas cerradas de las habitaciones calefaccionadas.
- La temperatura ambiental de los dormitorios no deberían estar bajo los 16°C. Si se cuenta con una envolvente térmica deficiente, esta temperatura ambiental debería ser aún mayor para evitar que se produzca un unto frío y se desarrolle el moho. La excepción sería si se mantiene la ventana abierta toda la noche.
- Habitaciones secundarias: Incluso en períodos de tiempo más largos, las habitaciones secundarias poco o nada utilizadas deben ser calentadas ligeramente (calefacción básica) para evitar una caída excesiva de la temperatura ambiente. La reducción permitida de la temperatura ambiente depende del aislamiento térmico; si el aislamiento térmico es deficiente, puede ser necesario calentar más.
- Reducción de la calefacción durante la noche o durante largos períodos de ausencia: En principio, se puede ahorrar energía bajando la temperatura ambiente. Sin embargo, se debe prestar atención a la interacción entre el consumo de energía (disminuye con temperaturas ambiente más bajas) y el riesgo de crecimiento de moho (aumenta con temperaturas ambiente más bajas debido a la reducción simultánea de la temperatura de la pared interior y exterior con el aumento asociado de la humedad relativa).

Posición de los muebles y fijaciones en muros

Si los muebles (p. ej. paredes de armarios, armarios empotrados, sofás, camas con somieres, etc.) están demasiado cerca de las paredes exteriores y, sobre todo, en las esquinas exteriores, se produce un movimiento de aire insuficiente (convección) detrás de los muebles (o, de forma análoga, detrás de los revestimientos de paredes) y un intercambio de radiación con la habitación muy reducido. Las consecuencias son bajas

CAPÍTULO 3. NORMATIVA EXISTENTE

temperaturas superficiales en el interior de la pared exterior detrás de los muebles y en la parte posterior o inferior de los muebles, relacionado con un mayor riesgo de desarrollo de moho.

Para evitar la formación de moho, es bueno no instalar muebles de gran tamaño como armarios, sofás, muebles de cocina o camas apegados al muro exterior. Si no se puede cumplir esta recomendación, se pueden aplicar las siguientes posibles medidas para reducir el riesgo de crecimiento de moho:

- Mejora del aislamiento térmico de la envolvente de manera continua.
- Ventilación detrás de muebles, alejar los muebles de la pared por lo menos 5 cm para crear una capa de aire que permita que el aire circule. En el caso de los muebles empotrados, también deben existir grandes aberturas de ventilación en la base y en los paneles circundantes.
- Se debería contar con planos específicos de la ubicación de los muebles.
- Se recomienda que los revestimientos de paredes exteriores, como los paneles de madera, se usen para una suficiente ventilación trasera (área libre en toda el área vertical del revestimiento exterior que se encuentra debajo y más arriba), o de otra manera prescindir de los revestimientos de las paredes exteriores. El aislamiento térmico interior no debe ser nunca ventilado. Las cortinas no deben llegar hasta el suelo y deben dejar espacio para la ventilación interior.
- Las carcasas de los radiadores deben proporcionar suficiente circulación de aire sobre el radiador.
- Las condiciones desfavorables surgen si se instalan camas con superestructura cerrada (caja de la cama) en la planta baja o por encima de áreas sin calefacción, por ejemplo (pasillos).

Medidas de calefacción y ventilación técnica:

Las viviendas se pueden ventilar de manera pasiva o apoyada por ventiladores mecánicos. Para esto la norma DIN 1946-6:2009-05 ofrece los siguientes sistemas de ventilación:

- A) Ventilación pasiva (o libre):
 - a. Ventilación cruzada por aireadores, apoyada por las diferencias de presiones naturales que se producen.
 - b. Ducto de ventilación convectiva
 - c. Ventilación por ventanas
- B) Ventilación mecánica:
 - a. Sistemas de inyección de aire
 - b. Sistemas de extracción de aire
 - c. Sistemas de inyección y extracción de aire

La ventilación puede ser para cuidar la humedad según DIN 1946-6:2009-05, además de otros requerimientos relacionados con la calidad del aire interior. La ventilación apoyada con ventiladores mecánicos permiten además una mayor posibilidad de ahorro energético (recuperadores de calor) y de cuidado del ambiente interior (filtros), requiriendo para esto en todo caso mayor inversión.

Por su parte los sistemas de calefacción se diferencian en torno a la problemática de la formación de moho, a través de :

- la disposición y el tamaño de las superficies de calentamiento,
- la temperatura superficial de las superficies de calentamiento,
- la proporción de radiación y convección,
- comportamiento técnico reglamentario.

En principio, estos sistemas deben considerarse favorables que conducen a un calentamiento grande, energético y por sobre todo desfavorable del interior de la superficie del muro exterior. Estos pueden ser tanto flujos de calor radiativo como convectivo.

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

4.1. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Este muro tipo se construye en la cámara de simulación de clima del CITEC, ubicada en la ciudad de Concepción (36°49'27"S, 79°00'49"O).

La NCh 1079:2008 clasifica a Concepción dentro de la zona climática Sur Litoral (SL), a continuación, se presenta la temperatura y humedad relativa durante el año:

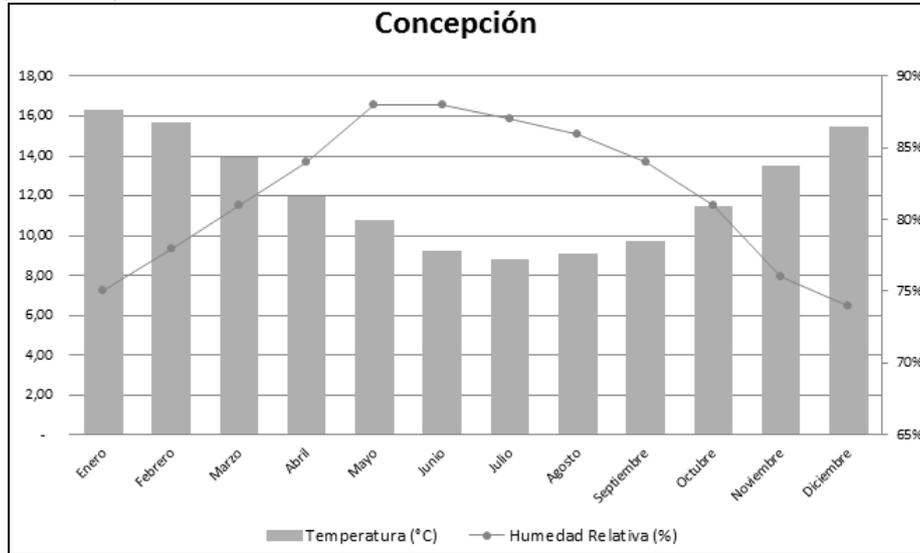


Figura N° 37: Temperatura y humedad relativa durante el año en Concepción (NCh1079:2008)

Se construye un muro de tabiquería con un valor de transmitancia térmica similar a una vivienda tipo PDA y estructurada en madera. Este muro se recubre con 4 diferentes materiales de terminación por su cara interior:

- a) Esmalte al agua común (EAC)
- b) Papel mural vinilizado (PMV)
- c) Esmalte al agua "antimoho" (EAA)
- d) Papel mural común (PMC)

Además de estos revestimientos interiores, el muro construido se compone de las capas descritas en el siguiente corte constructivo:

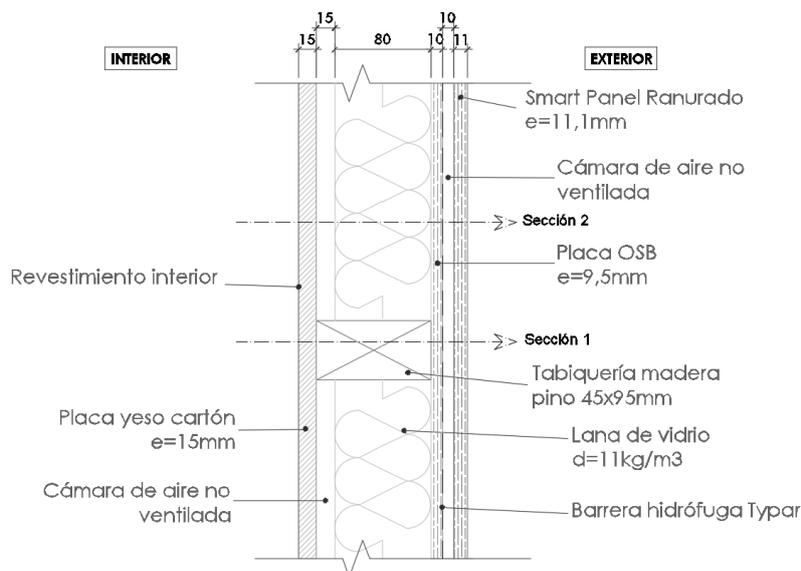


Figura N° 38: Corte constructivo del caso de estudio

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

El cálculo de transmitancia térmica de este muro se calcula en base a NCh853 y se detalla a continuación:

Tabla N° 17: Cálculo de transmitancia térmica del muro del caso de estudio según NCh853

	Transmisión vía aislante				Fuente λ
	Material	e (m)	λ (W/mK)	R (m ² k/W)	
1	Resistencia exterior			0,050	
2	Smart panel 11,1mm	0,011	0,055	0,202	N°922776 /2010
3	Cámara de aire no ventilada	0,010		0,140	Figura C.1 NCh 853
4	Placa OSB	0,010	0,130	0,073	Tabla A.1 NCh 853
5	Lana de vidrio d=11kg/m3	0,080	0,041	1,951	N° 808.181/2014
6	Cámara de aire no ventilada	0,015		0,155	Figura C.1 NCh 853
7	Plancha yeso cartón d=710kg/m3	0,015	0,240	0,063	N° 417.335-3 SEH 110/HT/2007
8	Resistencia interior			0,120	
	Transmisión vía pie derechos				
	Material	e (m)	λ (W/mK)	R (m ² k/W)	
1	Resistencia exterior			0,050	
2	Smart panel 11,1mm	0,011	0,055	0,202	N°922776 /2010
3	Cámara de aire no ventilada	0,010		0,140	Figura C.1 NCh 853
4	Placa OSB	0,010	0,130	0,073	Tabla A.1 NCh 853
5	Madera pie derecho (pino insigne)	0,095	0,104	0,913	Tabla A.1 NCh 853
6	Plancha yeso cartón d=710kg/m3	0,015	0,240	0,063	N° 417.335-3 SEH 110/HT/2007
7	Resistencia interior			0,120	
	Ponderación	R (m ² K/W)	U (W/m ² K)	Pond	Total
1	Transmisión vía aislante	2,754	0,363	85,0%	0,309
2	Transmisión vía pie derechos	1,561	0,641	15,0%	0,096
	Total U ponderado				0,405

Como se puede observar, el muro posee un valor de transmitancia térmica muy superior a la normativa térmica existente en Chile (OGUC Art. 4.1.10). Esta transmitancia térmica cumpliría el PDA de Concepción, Temuco y las del norte de estas.

A continuación se detallan las características de los revestimientos utilizados. En Anexo 5 se adjuntan las fichas técnicas con el detalle de los materiales utilizados.

Tabla N° 18: características de los revestimientos utilizados en los cálculos teóricos y experimentales.

Caso de estudio	Nombre asignado	Abreviación	Tipo de revestimiento	Nombre comercial	Marca	Naturaleza química	Característica principal	Espesor (mm)	Valor de Sd (m)	Fuente Sd
1	Esmalte al agua común	EAC	Pintura base agua semibrillo	Esmalte al agua semibrillo	Sipa	Dispersiones acrílicas reducibles con agua.	Para baños y cocina, lavable y con biocidas.	0,020	2,540	Calculado desde μ de la base de datos existente en Chile
2	Papel mural vinilizado	PMV	Papel mural con capa de pvc	Stucco Marfil	Colowall	Celulosa	Papel mural con capa vinilizada.	0,500	2,450	Base de datos WUFI
3	Esmalte al agua antimoho	EAA	Pintura base agua semibrillo	Pieza & Fachada, con Bio Tech	Ceresita	Resinas sintéticas emulsionadas en agua	Para baños y cocina y exteriores, lavable con biocidas.	0,020	0,100	Según ensayo realizado de μ
4	Papel mural común	PMC	Papel mural sin capa de pvc	Boston Celeste 322	Colowall	Celulosa	Papel mural sin capa vinilizada.	0,250	1,225	Base de datos WUFI

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

4.2. CALCULO ESTÁTICO CON HERRAMIENTA DITEC

Se realiza el cálculo según lo descrito en el capítulo 1, con el método descrito en la herramienta de cálculo diseñada por la DITEC y que se basa en NCh1973:2014.

A continuación se presentan los resultados para cada sección (favorable y desfavorable) de cada uno de los 4 recubrimientos utilizados, específicamente se presenta el perfil de saturación y luego la cantidad de puntos de condensación según sea la humedad relativa evaluada, además de la humedad relativa crítica evaluada.

Condiciones ambientales, aplica para todos los casos evaluados:

Ubicación del proyecto:	Provincia de Concepción
Condiciones exteriores:	5,7°C; 96% de HR (temp. mín. mes de julio)
Condiciones interiores:	19°C; 60%, 75% y 80% de HR
HR máx. aceptable, φ_{psicr} :	1
Dirección de flujo:	Horizontal

Caso 1: Esmalte al agua común (EAC)

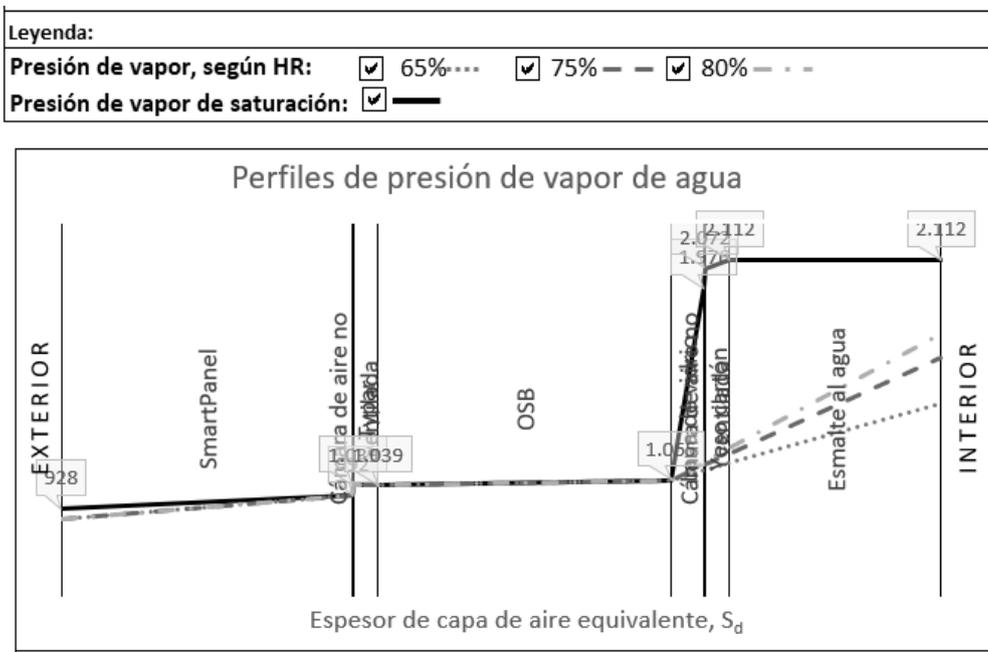


Figura N° 39: Perfiles de presión de vapor de agua EAC

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

Tabla N° 19: Resumen evaluación de condensaciones superficiales e intersticiales EAC

Calcular HR Cond	Limpiar		Puntos de análisis		HR Cond.
HR interior, ϕ_i :	65%	75%	80%	53%	
Condensación superficial:	No	No	No	No	
Res. Térmica caso base	2,754	2,754	2,754	275%	
Res. Térmica total mín, $R_{T,min}$	0,257	0,382	0,490	0,177	
Condensación intersticial:	Sí	Sí	Sí	Sí	
Detalle de interfaces con condensación:					
Superficie exterior					
Interfase 1	X	X	X		
Interfase 2	X	X	X		
Interfase 3	X	X	X		
Interfase 4	X	X	X	X	
Interfase 5					
Interfase 6					
Interfase 7					
Superficie interior					
N° Interfaces condensación:	4	4	4	1	
Total:	12 Interfaces				

Caso 2: Papel mural vinilizado (PMV)

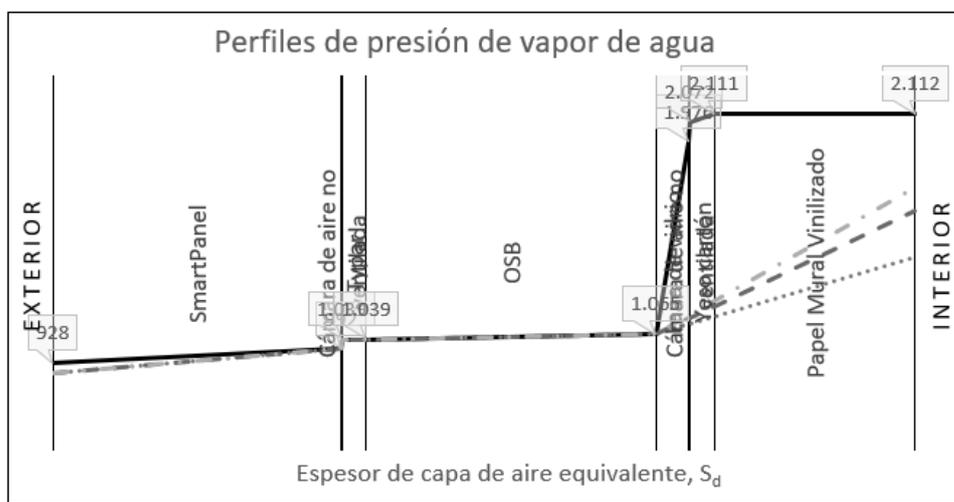


Figura N° 40: Perfiles de presión de vapor de agua PMV

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

Tabla N° 20: Resumen evaluación de condensaciones superficiales e intersticiales PMV

Calcular HR interior	Limpiar			Puntos de análisis	HR Cond.
HR interior, ϕ_i :	65%	75%	80%	53%	
Condensación superficial:	No	No	No	No	
Res. Térmica caso proyectado	2,754	2,754	2,754	275%	
Res. Térmica total mín, $R_{T,min}$	0,382	0,382	0,490	0,177	
Condensación intersticial:	Sí	Sí	Sí	Sí	
Detalle de interfases con condensación:					
Superficie exterior					
Interfase 1	X	X	X		
Interfase 2	X	X	X		
Interfase 3	X	X	X		
Interfase 4	X	X	X	X	
Interfase 5					
Interfase 6					
Interfase 7					
Superficie interior					
N° Interfaces condensación:	4	4	4	1	
Total:	12 Interfases				

Caso 3: Esmalte al agua antimoho (EAA)

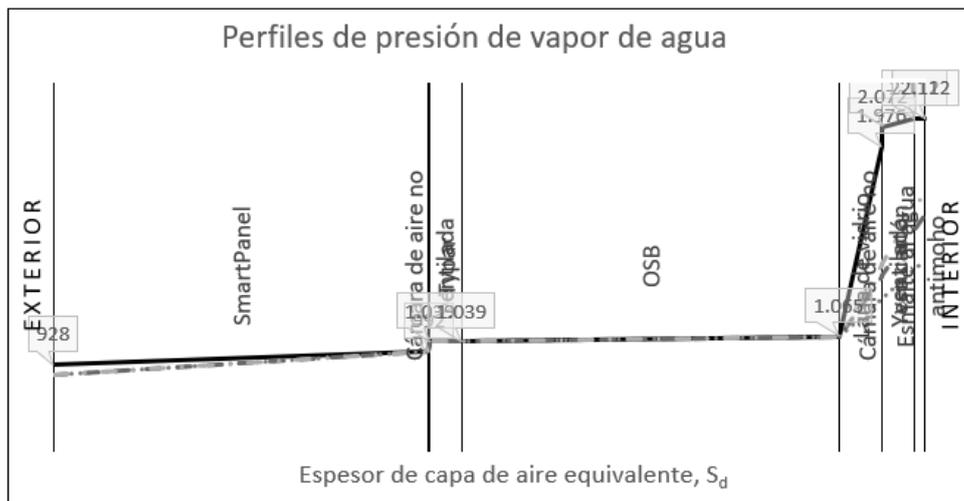


Figura N° 41: Perfiles de presión de vapor de agua EAA

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

Tabla N° 21: Resumen evaluación de condensaciones superficiales e intersticiales EAA

Calcular HR Cond	Limpiar	Puntos de análisis			HR Cond.
HR interior, ϕ_i :		65%	75%	80%	50%
Condensación superficial:		No	No	No	No
Res. Térmica caso base		2,754	2,754	2,754	275%
Res. Térmica total mín, $R_{T,min}$		0,257	0,382	0,490	0,162
Condensación intersticial:		Sí	Sí	Sí	Sí
Detalle de interfases con condensación:					
Superficie exterior					
Interfase 1		X	X	X	
Interfase 2		X	X	X	
Interfase 3		X	X	X	
Interfase 4		X	X	X	X
Interfase 5					
Interfase 6					
Interfase 7					
Superficie interior					
N° Interfases condensación:		4	4	4	1
Total:		12 Interfases			

Caso 4: Papel mural común (PMC)

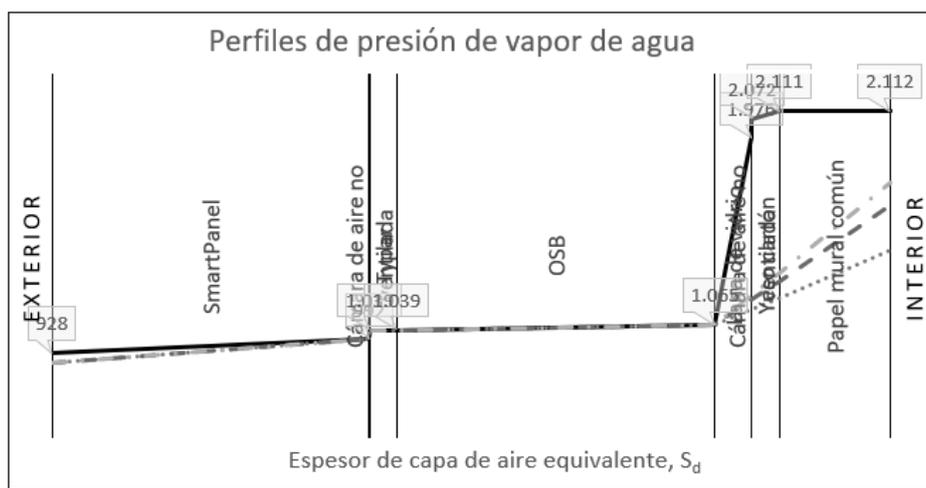


Figura N° 42: Perfiles de presión de vapor de agua PMC

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

Tabla N° 22: Resumen evaluación de condensaciones superficiales e intersticiales PMC

Calcular HR interior	Puntos de análisis			HR Cond.
<input type="button" value="Limpiar"/>	65%	75%	80%	51%
HR interior, ϕ_i :				
Condensación superficial:	No	No	No	No
Res. Térmica caso proyectado	2,754	2,754	2,754	275%
Res. Térmica total mín, $R_{T,min}$	0,382	0,382	0,490	0,167
Condensación intersticial:	Sí	Sí	Sí	Sí
Detalle de interfases con condensación:				
Superficie exterior				
Interfase 1	X	X	X	
Interfase 2	X	X	X	
Interfase 3	X	X	X	
Interfase 4	X	X	X	X
Interfase 5				
Interfase 6				
Interfase 7				
Superficie interior				
N° Interfaces condensación:	4	4	4	1
Total:	12 Interfases			

4.3. CÁLCULO DINÁMICO

El cálculo dinámico se realiza con el software WUFI Pro 6.4. WUFI es el acrónimo de "Wärme- und Feuchtetransport instationär" ("Transporte transitorio de calor y humedad"). WUFI se diseñó para calcular el transporte simultáneo de calor y humedad en una dimensión de un componente de construcción multicapa. Los resultados de la simulación dinámica de este software incluyen un análisis de isopleas y posible formación de moho, sin embargo también se incluye en esta tesis el análisis realizado por los complementos de análisis biológico del software, denominados WUFI Bío y WUFI VTT.

Se realiza antes que nada la presentación de las condiciones ambientales y corte constructivo considerado, luego se presentan los resultados para cada sección del corte constructivo para cada material de terminación estudiado. Específicamente para cada material se presentan los siguientes gráficos de resultados:

- A) Contenido total de agua (Kg/m²)
- B) Temperatura superficial vs. temperatura punto de rocío o de condensación (°C)
- C) Isopleas de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM_{bau})
- D) Contenido de agua de la espesa vs. contenido crítico de agua (Kg/m³)
- E) Tasa de crecimiento del moho (mm/año)
- F) Índice de moho (-)

Después de la presentación de los resultados gráficos se realiza un análisis comparativo a modo de resumen que permita identificar los casos más críticos registrados.

Después de identificado el caso más crítico, se procederá a variar la clase higrométrica para poder determinar los límites críticos de las variables ambientales versus el resultado de formación de moho calculado con el software, para poder posteriormente determinar sus relaciones.

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

4.3.1. Consideraciones ambientales:

Para el cálculo dinámico se consideró el clima exterior de Concepción registrado en la base de datos de Design Builder Chile. Este clima es horario y contiene toda la información necesaria para el cálculo de WUFI con excepción del registro de lluvias. En esta tesis no se realiza diferencia entre un muro expuesto a las lluvias y otro que no por lo que el registro de lluvias en este caso no se considera.

A continuación se detalla el gráfico climático considerado para Concepción dentro del software WUFI:

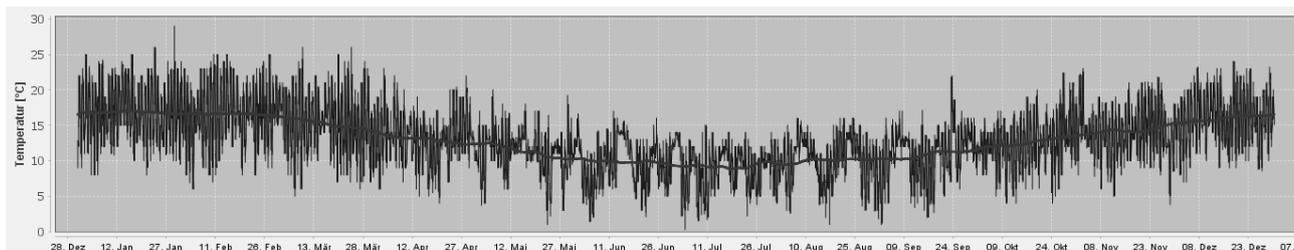


Figura N° 43: Temperatura ambiental exterior anual de Concepción.

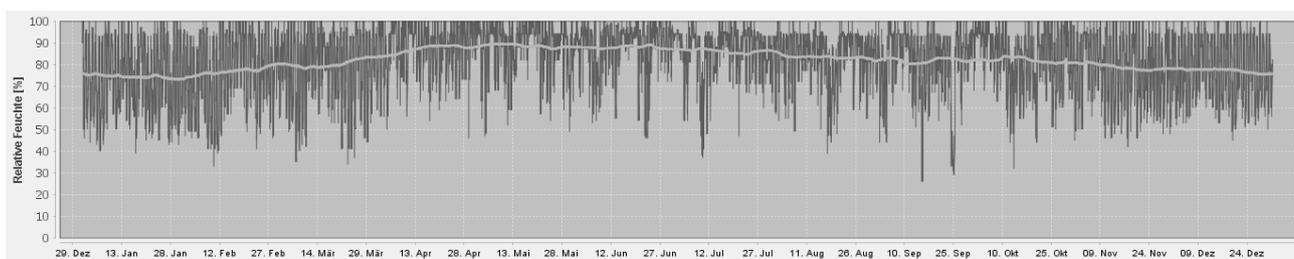


Figura N° 44: Humedad relativa ambiental exterior anual de Concepción.

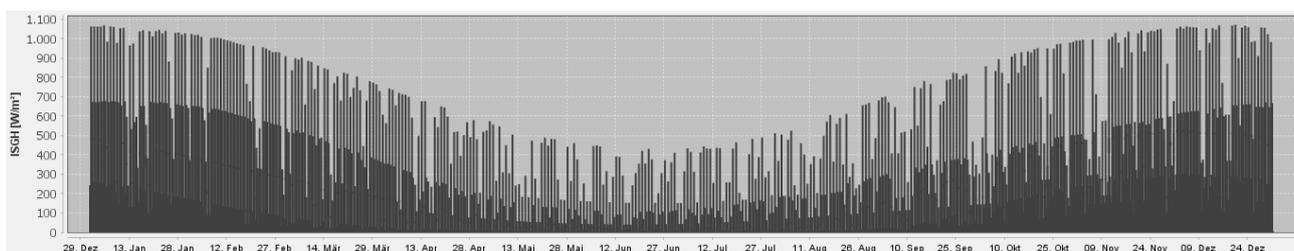


Figura N° 45: Radiación global anual de Concepción.

El clima interior se define según ISO 13788 fijando la temperatura ambiental interior en 20°C y variando la humedad relativa según la clase higrométrica 4 que define el contenido de agua en base a la temperatura ambiental exterior.

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

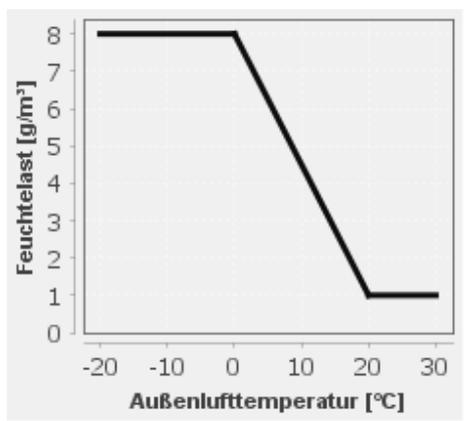


Figura N° 46: Clase higrométrica 4, ISO 13788.

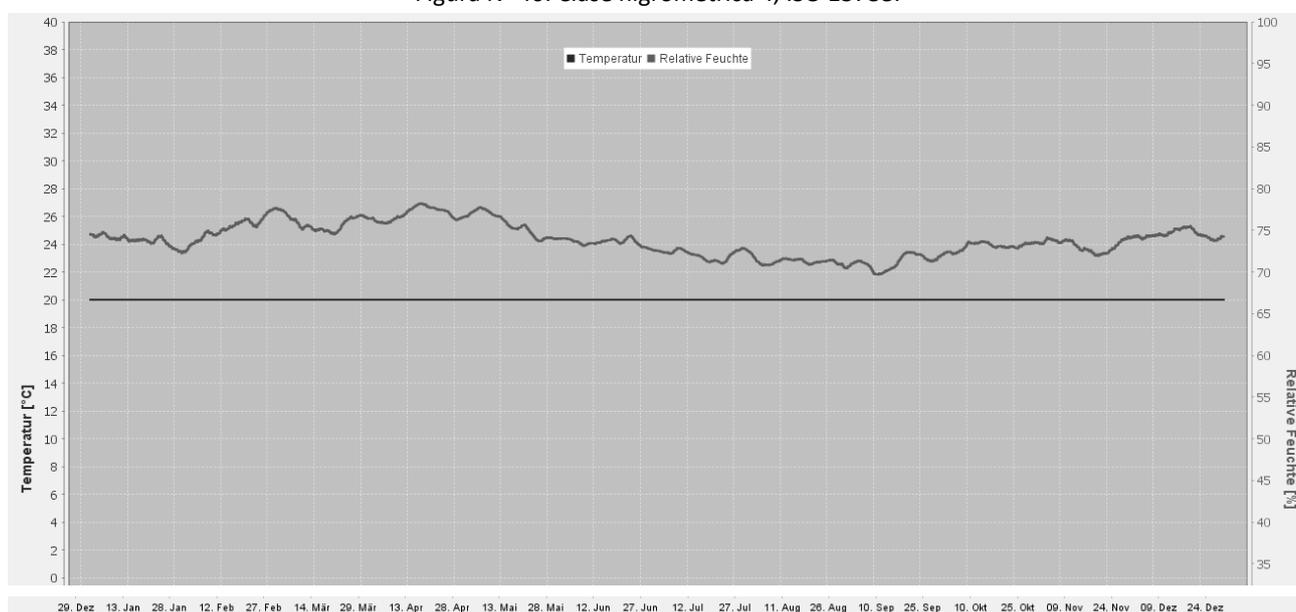


Figura N° 47: Temperatura y humedad relativa ambiental interior considerada.

El periodo de análisis mínimo recomendado en Fraunhofer Institut es de 3 años por lo que el contenido de agua al final del periodo y otros parámetros de análisis están considerados al término de ese periodo.

4.3.2. Consideraciones del corte constructivo seleccionado

Se realiza la simulación higrotérmica dinámica (WUFI Pro) y el análisis de predicción de crecimiento de moho (WUFI Bio y WUFI VTT) sobre el corte constructivo del muro tipo PDA presentado en la figura 39 y sus 4 materiales de terminación:

- a) Esmalte al agua común (EAC)
- b) Papel mural vinilizado (PMV)
- c) Esmalte al agua antimoho (EAA)
- d) Papel mural común (PMC)

Para cada una de las alternativas consideradas se realiza la simulación y análisis en la sección normal del elemento o del aislante térmico.

Si bien en Chile no existe una base de datos robusta de propiedades higrotérmicas de materiales de construcción (Mercado 2018), el software permite basarse en materiales similares ensayados en otros países, y

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

en el caso que se cuente con algunas propiedades se pueden copiar y modificar. Las propiedades de los materiales considerados fueron establecidos según los valores existentes en la biblioteca de materiales de WUFI y en algunos casos, al no existir homologación directa, se copió y modificó el valor del material que se requería. Se adjuntan los parámetros de cada material considerado en Anexo 4.

4.3.3. Resultados de la simulación higrotérmica dinámica

Los siguientes gráficos son el resultado de la simulación del corte constructivo y sus 4 opciones de revestimiento de terminación en el software WUFI Pro, Bio y VTT.

Para el gráfico obtenido de WUFI Bio que indica la tasa de crecimiento de moho y para el gráfico obtenido de WUFI VTT que indica el índice de crecimiento de moho se cuenta con las escalas y referencias de colores de semáforos específicas y que se detallan en el Anexo 2.

Caso 1: Esmalte al agua común (EAC)

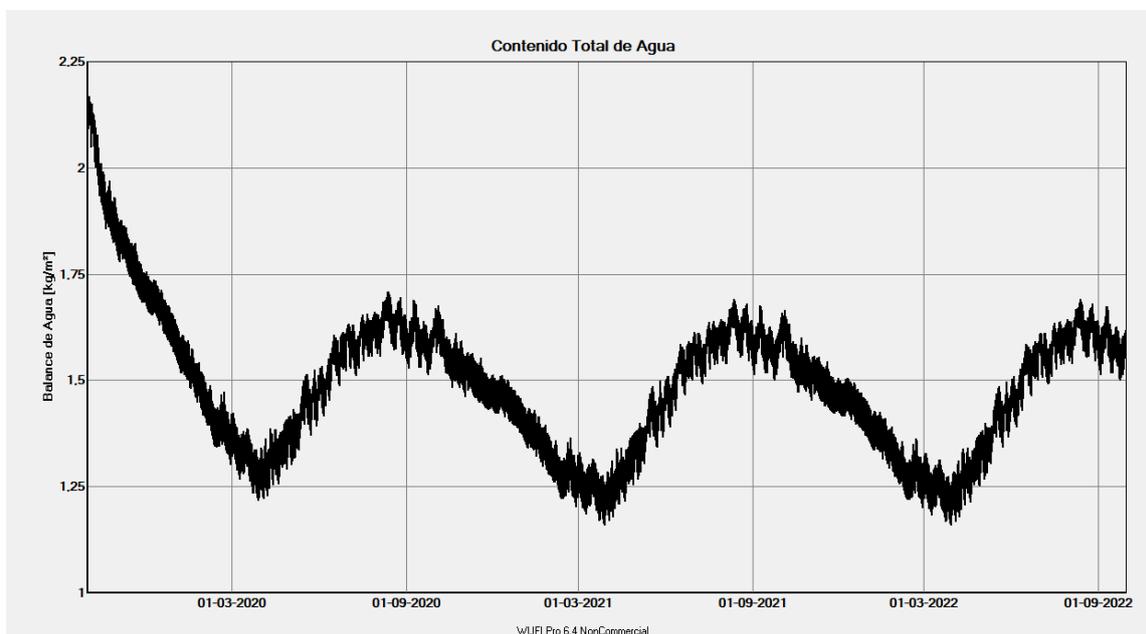


Figura N° 48: Contenido total de agua (Kg/m2) EAC

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

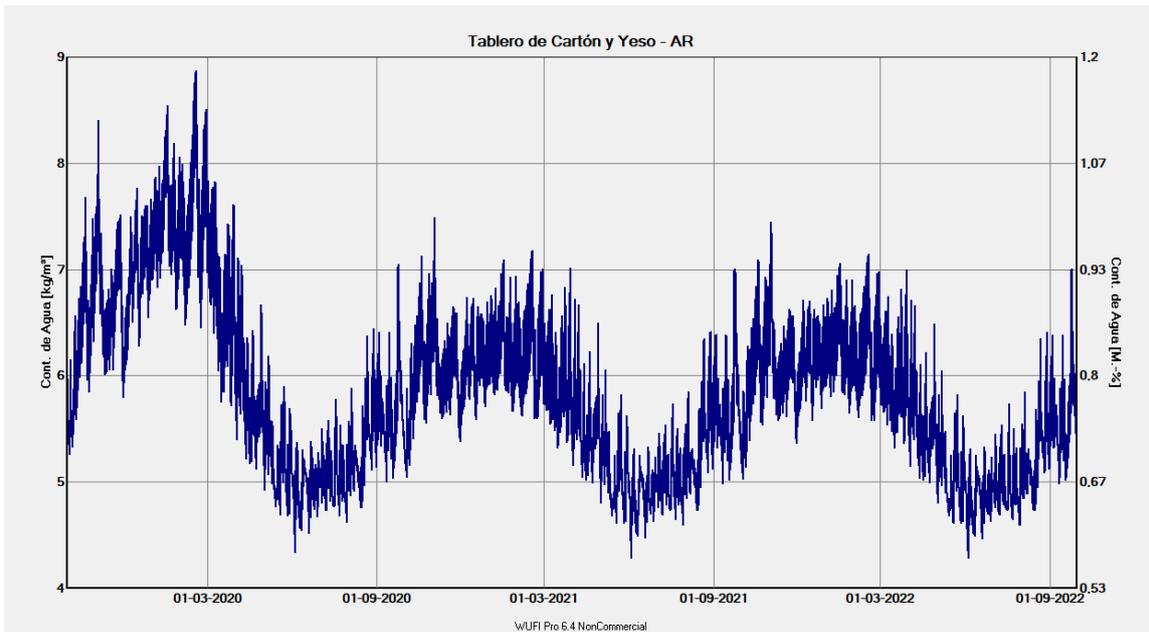


Figura N° 49: Contenido de agua capa yeso cartón (Kg/m2) EAC

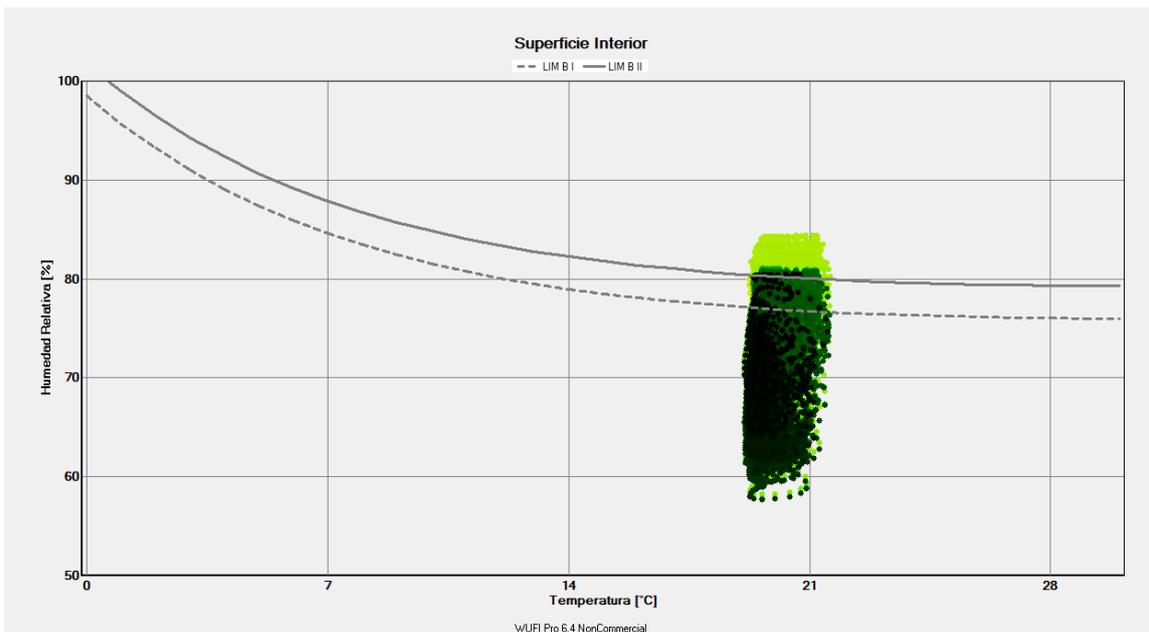


Figura N° 50: Isopletas de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM_{bau}) EAC

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

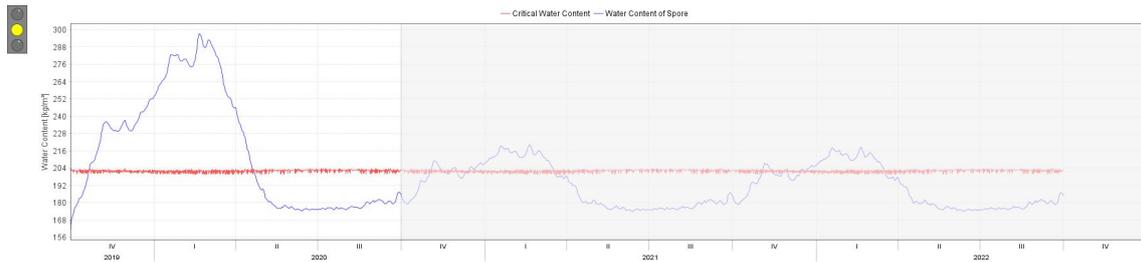


Figura N° 51: Contenido de agua de la espora vs. contenido crítico de agua (Kg/m3) EAC

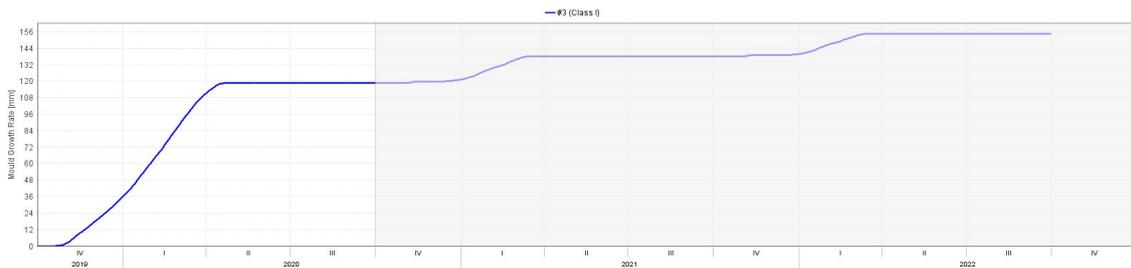


Figura N° 52: Tasa de crecimiento del moho (mm) EAC

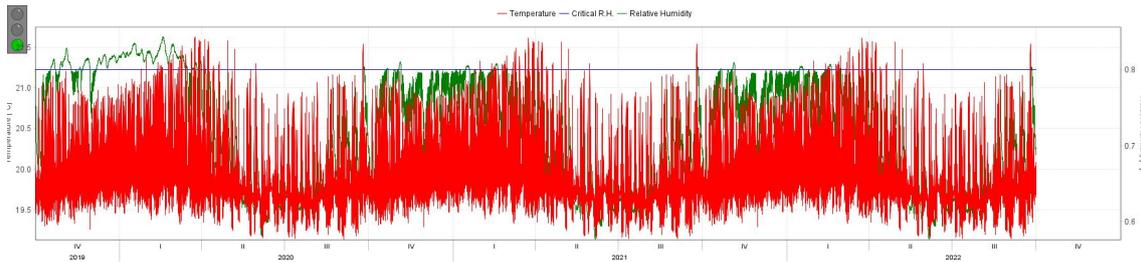


Figura N° 53: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, EAC

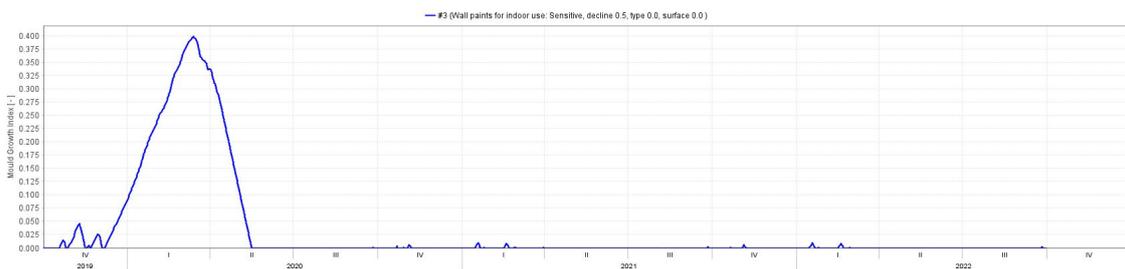


Figura N° 54: Índice de moho (-) EAC

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

Caso 2: Papel mural vinilizado (PMV)

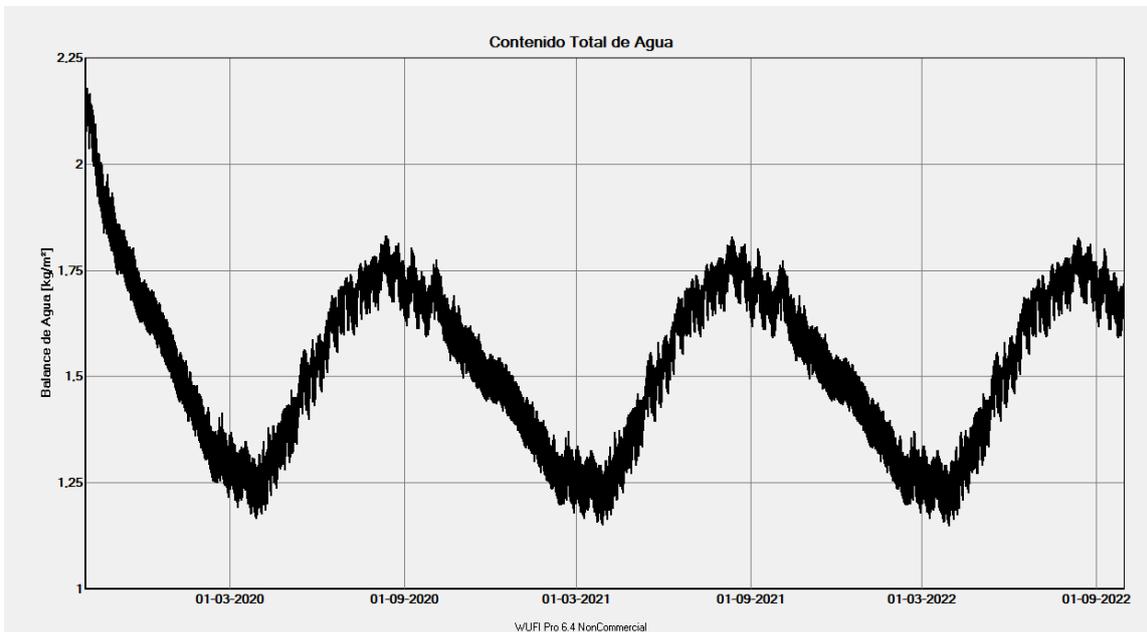


Figura N° 55: Contenido total de agua (Kg/m²) PMV

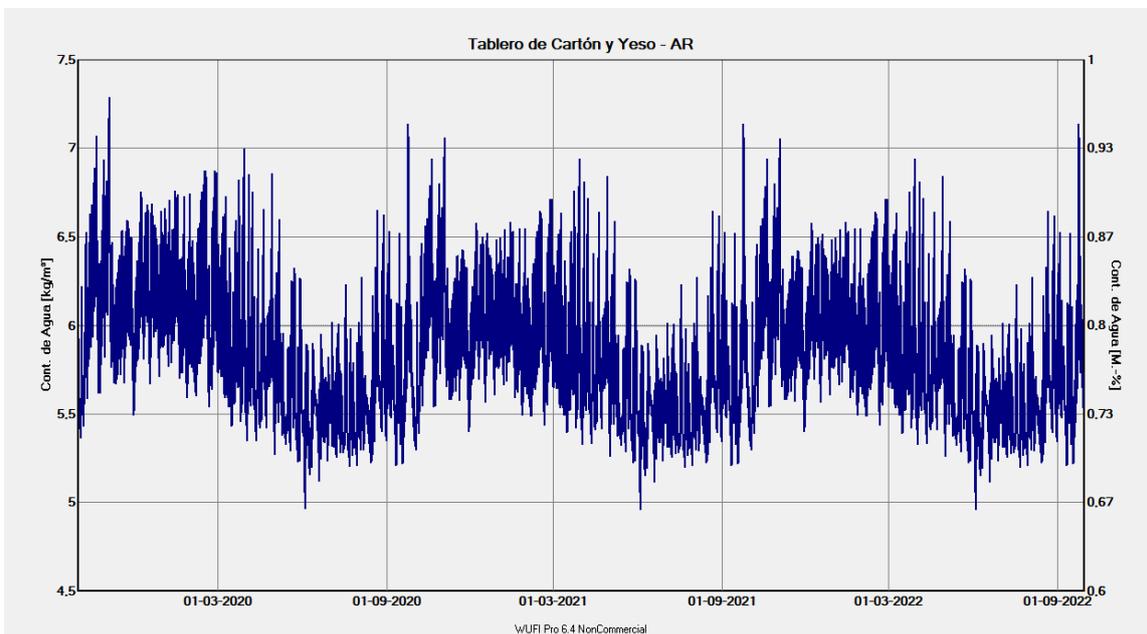


Figura N° 56: Contenido de agua capa yeso cartón (Kg/m²) PMV

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

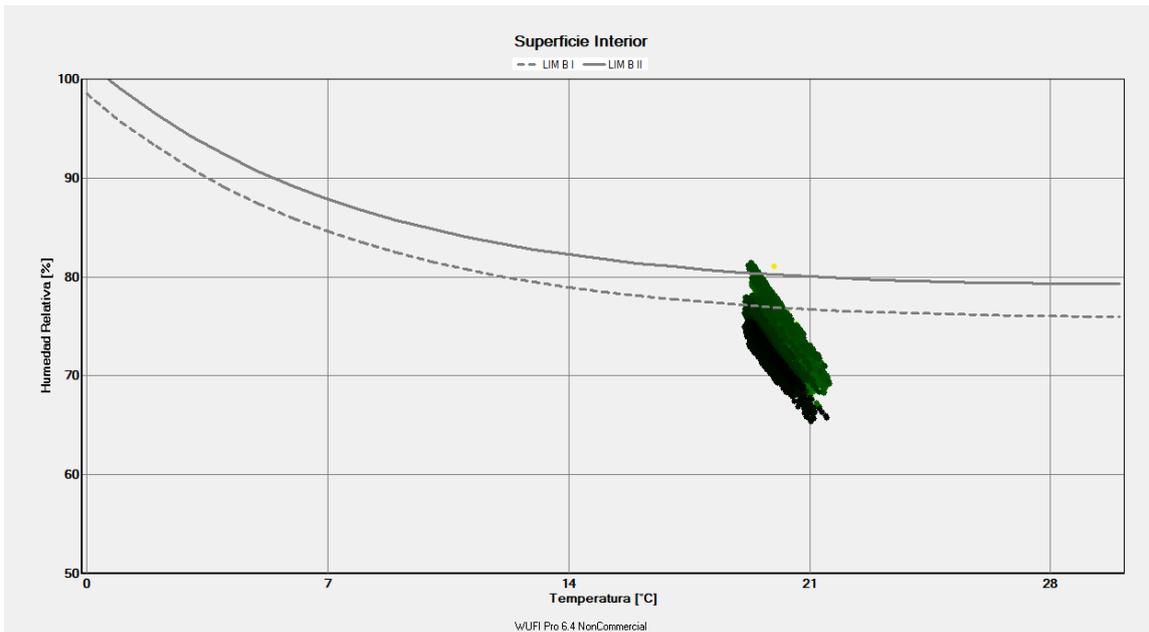


Figura N° 57: Isopletas de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM_{bau}) PMV

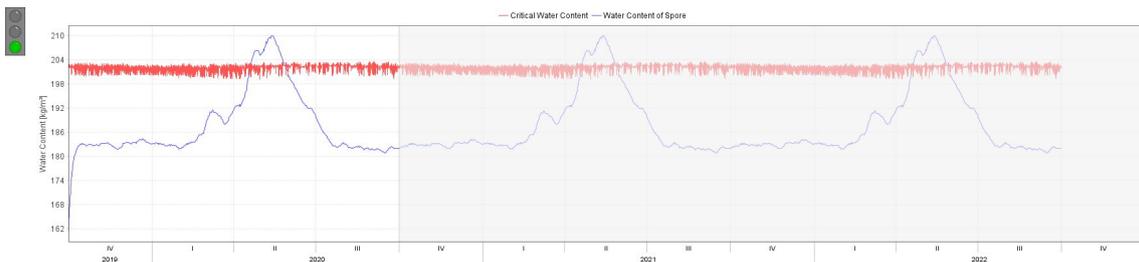


Figura N° 58: Contenido de agua de la espora vs. contenido crítico de agua (Kg/m3) PMV

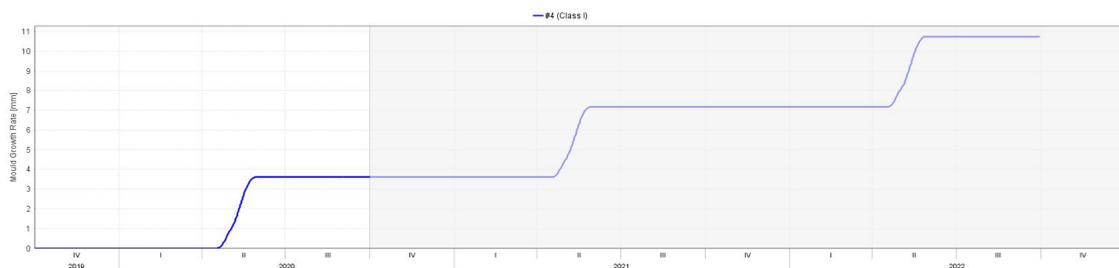


Figura N° 59: Tasa de crecimiento del moho (mm) PMV

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

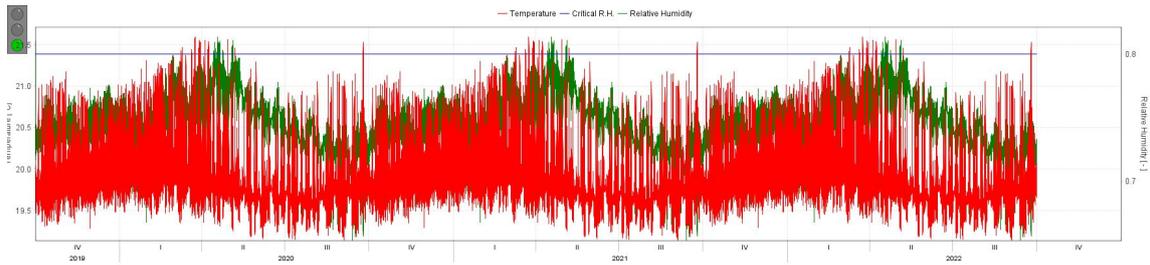


Figura N° 60: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, PMV

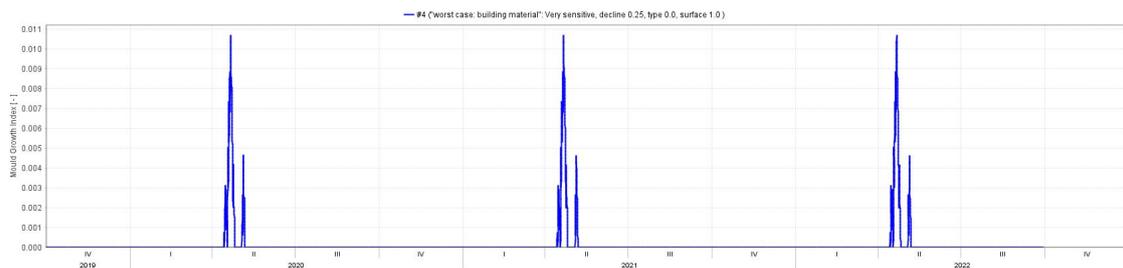


Figura N° 61: Índice de moho (-) PMV

Caso 3: Esmalte al agua antimoho (EAA)

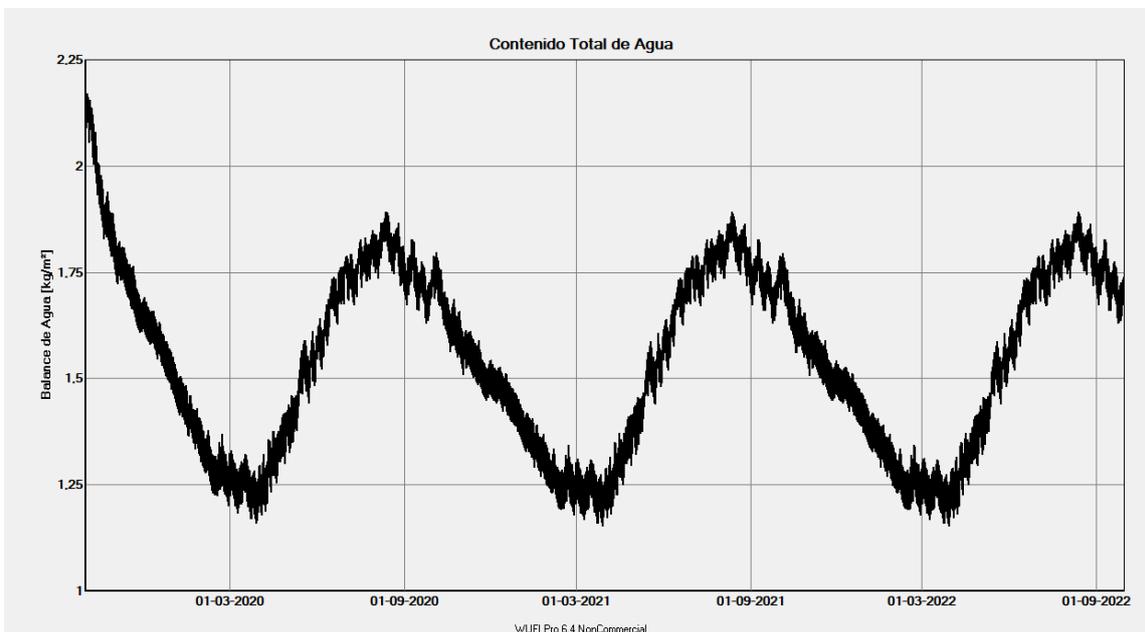


Figura N° 62: Contenido total de agua (Kg/m2) EAA

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

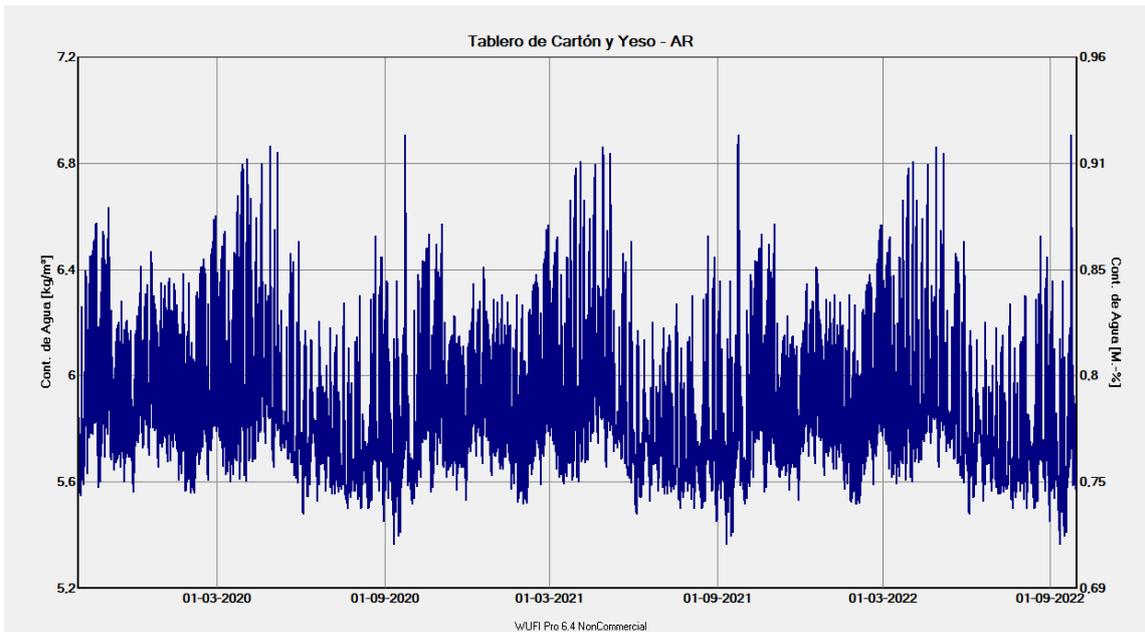


Figura N° 63: Contenido de agua capa yeso cartón (Kg/m2) EAA

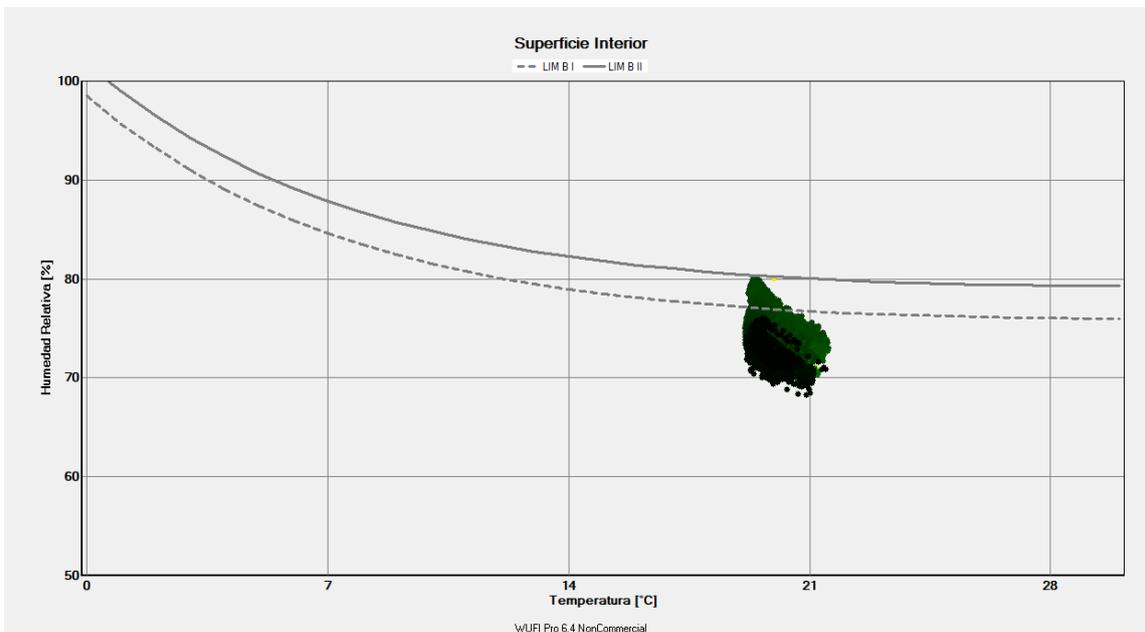


Figura N° 64: Isopletas de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM_{bau}) EAA.

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

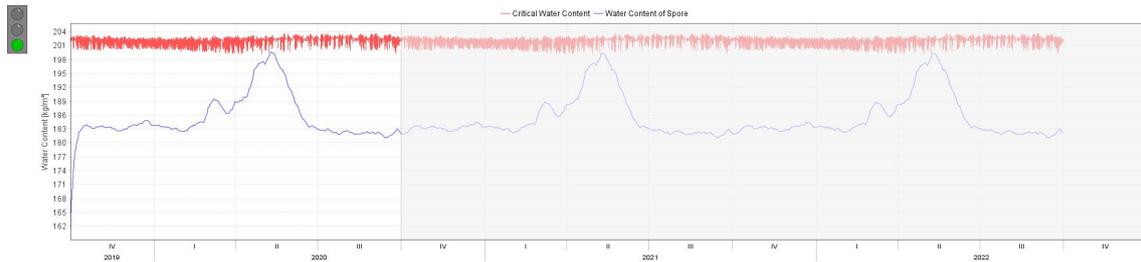


Figura N° 65: Contenido de agua de la espora vs. contenido crítico de agua (Kg/m3) EAA.

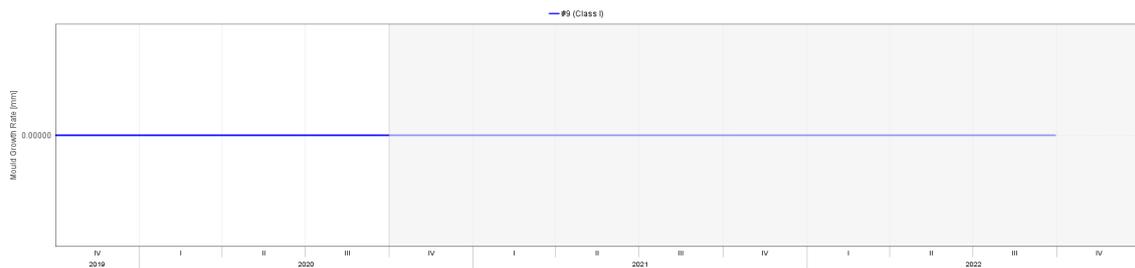


Figura N° 66: Tasa de crecimiento del moho (mm) EAA

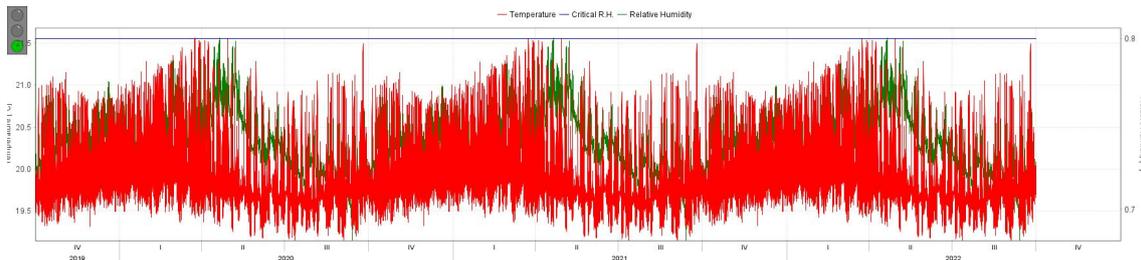


Figura N° 67: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, EAA

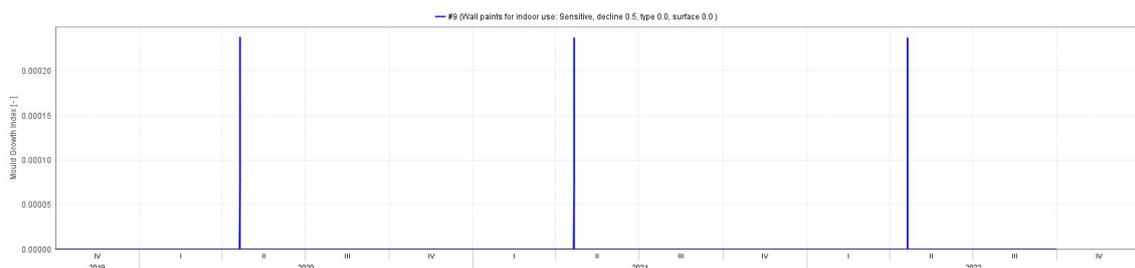


Figura N° 68: Índice de moho (-) EAA

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

Caso 4: Papel mural común (PMC)

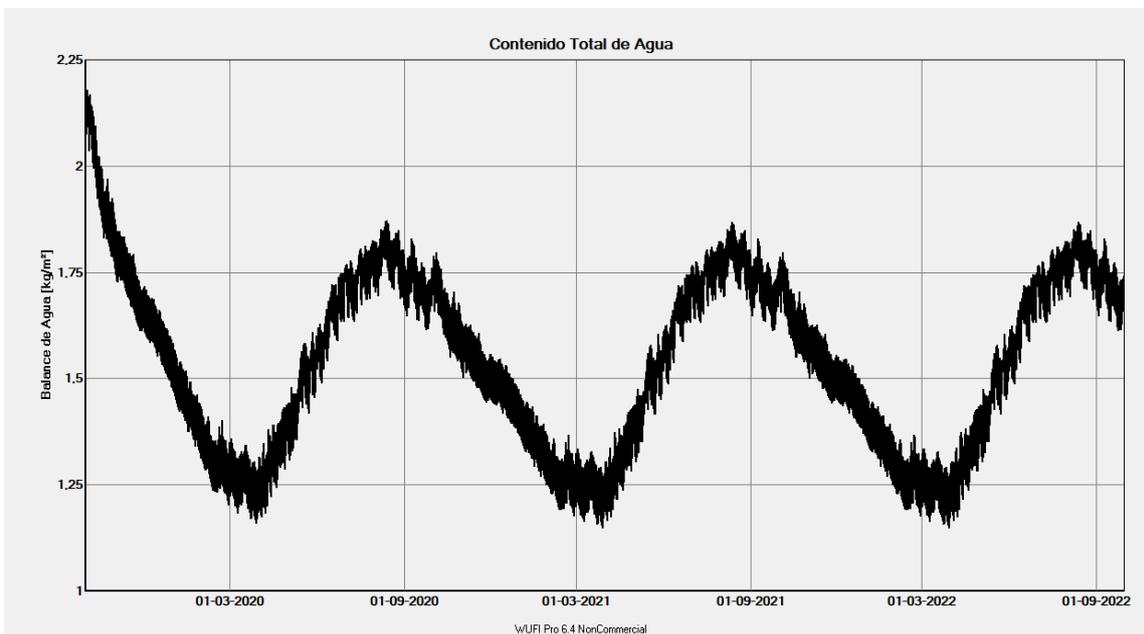


Figura N° 69: Contenido total de agua (Kg/m2) PMC

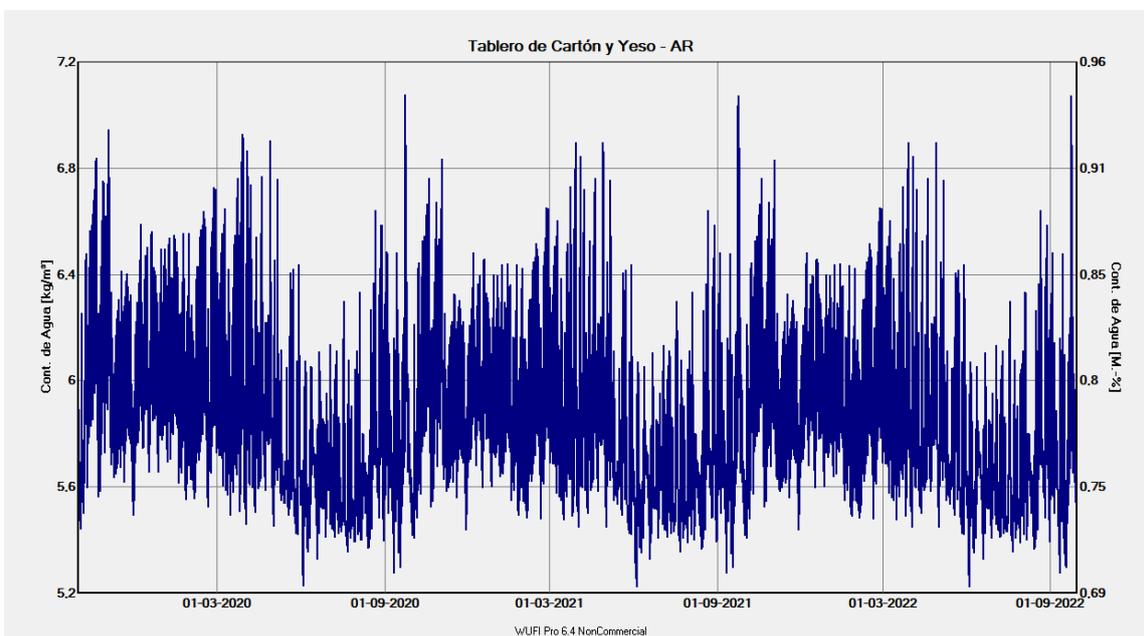


Figura N° 70: Contenido de agua capa yeso cartón (Kg/m2) PMC

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

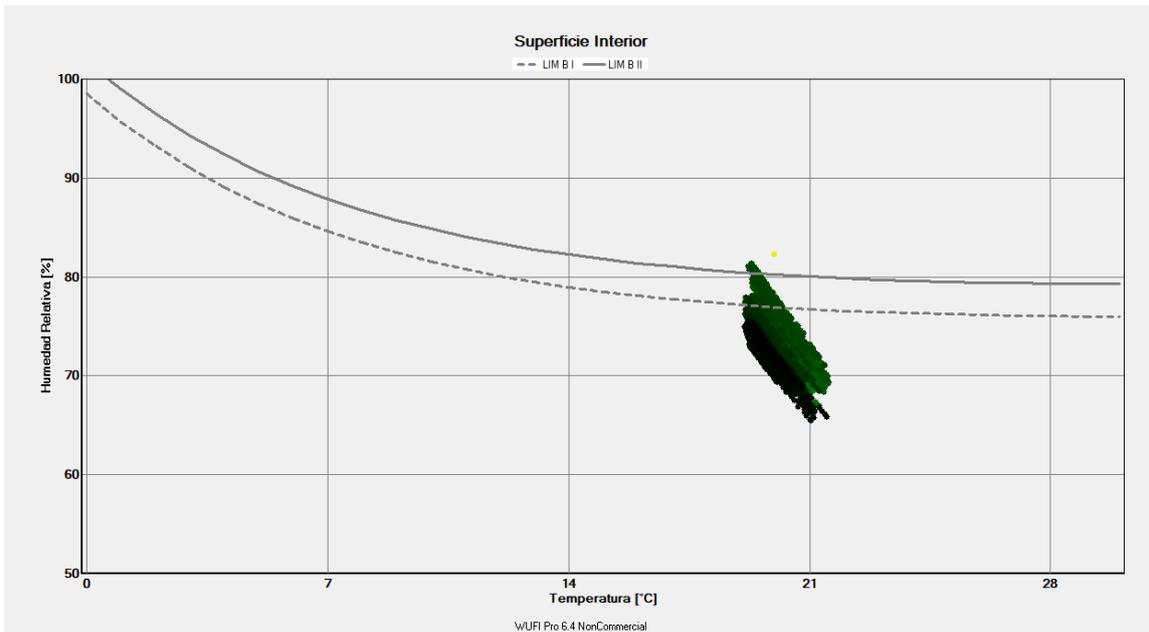


Figura N° 71: Isopletras de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM_{bau}) PMC

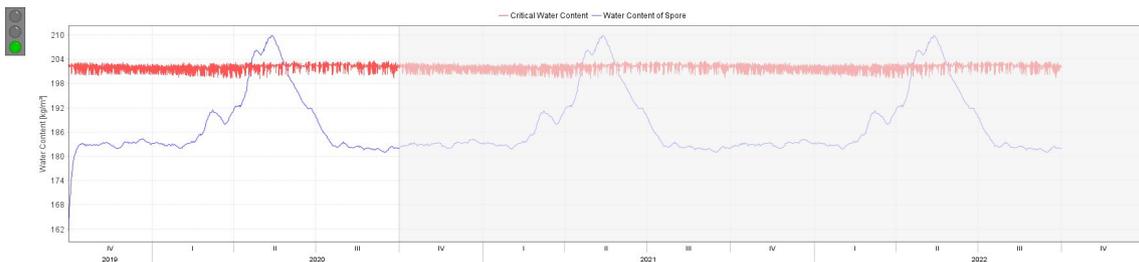


Figura N° 72: Contenido de agua de la espora vs. contenido crítico de agua (Kg/m3) PMC

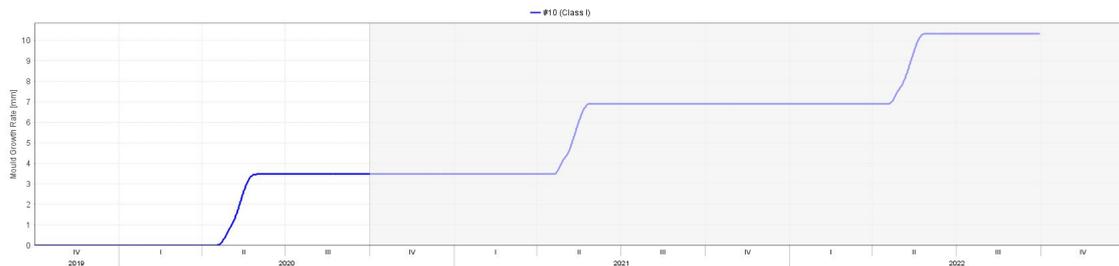


Figura N° 73: Tasa de crecimiento del moho (mm) PMC

CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

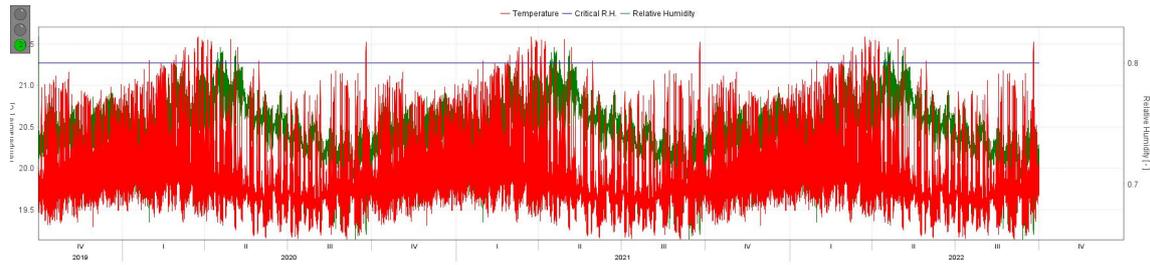


Figura N° 74: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, PMC

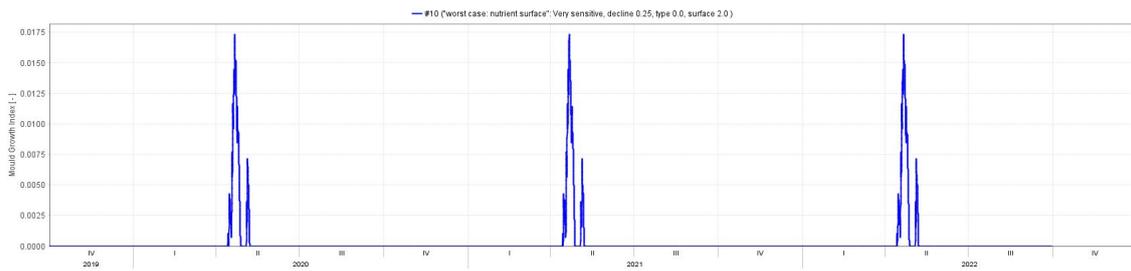


Figura N° 75: Índice de moho (-) PMC

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

5.1. DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO

El caso de estudio se desarrolla en la cámara de simulación de clima del CITEC, ubicada en la ciudad de Concepción ($36^{\circ}49'27''S$, $79^{\circ}00'49''O$).

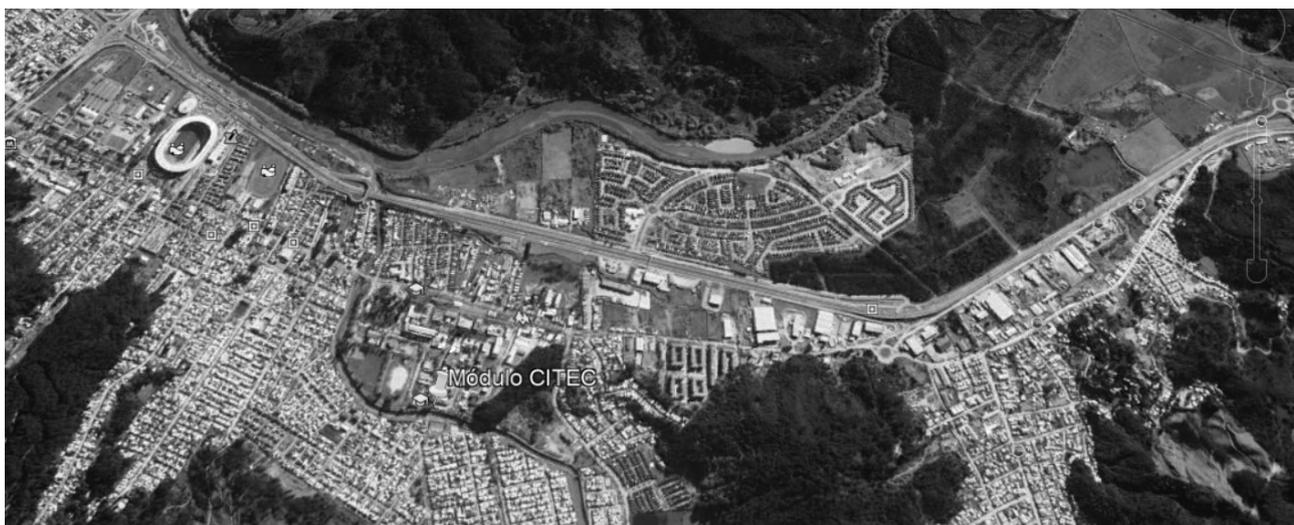


Figura N° 76: Ubicación de la cámara de simulación de clima CITEC, en la ciudad de Concepción Google Earth)

Esta cámara cuenta con equipos que permiten controlar el clima interior, con vanos de muro donde se pueden construir muros tipo a estudiar, lo cual conlleva a que se realice el experimento sobre un muro a escala real. En este caso el muro tipo del caso de estudio de esta tesis se construye en la fachada norte de la cámara de simulación de clima.



Figura N° 77: Cámara de simulación de clima del CITEC

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

En la siguiente imagen se puede observar la construcción del muro del caso de estudio en la cámara de simulación de clima del CITEC. En la imagen de la derecha se pueden observar los 4 materiales de recubrimiento utilizados.



Figura N° 78: Fotografías de las etapas de la construcción del muro del caso de estudio.

Se construye un muro de tabiquería con un valor de transmitancia térmica similar a una vivienda tipo PDA y estructurada en madera. Este muro se recubre con los 4 diferentes materiales de terminación sobre su cara interior:

- a) Esmalte al agua común (EAC)
- b) Papel mural vinilizado (PMV)
- c) Esmalte al agua antimoho (EAA)
- d) Papel mural común (PMC)

En Anexo 5 se adjuntan las fichas técnicas con el detalle de los materiales utilizados.

Sobre este muro se realizan mediciones de variables que permitan determinar la ocurrencia de condensaciones y formación de moho. Los variables dependientes que se miden, en cada sección de cada recubrimiento se especifican a continuación:

1. Temperatura superficial interior
2. Contenido de agua de la primera capa
3. Registro de condensación superficial
4. Registro de formación de moho superficial

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO



Figura N° 79: Fotografías de la medición de variables sobre el muro tipo y sus 4 diferentes recubrimientos.

Además se cuenta con los datos obtenidos de la estación meteorológica del laboratorio que entrega los siguientes registros:

1. Temperatura ambiental exterior e interior
2. Humedad relativa exterior e interior
3. Precipitaciones
4. Vientos predominantes

Los registros que se analizarán en esta investigación serán los relacionados con los cálculos teóricos para que se puedan realizar comparaciones y análisis.

El registro de condensaciones se realiza con hojas metálicas que registran diferencias de corriente y resistencia al paso de esta diferenciando la presencia o no de agua líquida. El modelo de equipo utilizado para el registro de formación de condensación es el denominado "Leaf Wetness Sensor".



Figura N° 80: Dielectric Leaf Wetness Sensor, sensor hoja de humedad dielectrico utilizado para el registro de condensaciones (Decagon Devices, Inc., 2016)

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

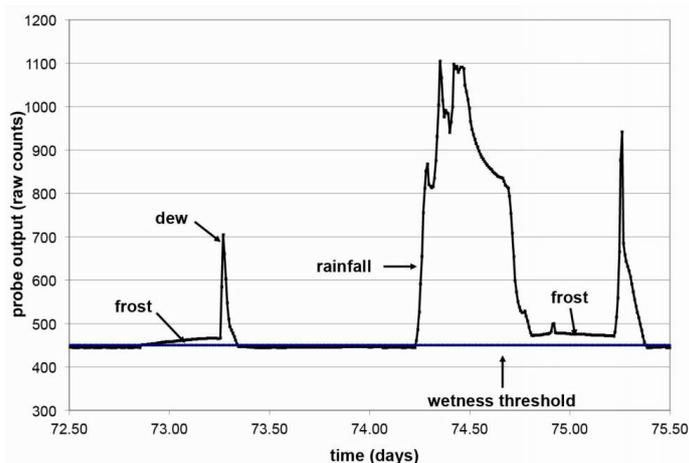


Figura N° 81: Registro típico de una hoja (Decagon Devices, Inc., 2016)

El registro de formación de moho se hace de manera visual a través de fotografías SEM (Scanning electron microscopy) de muestras de cada revestimiento estudiado.

5.2. REGISTRO CLIMÁTICO

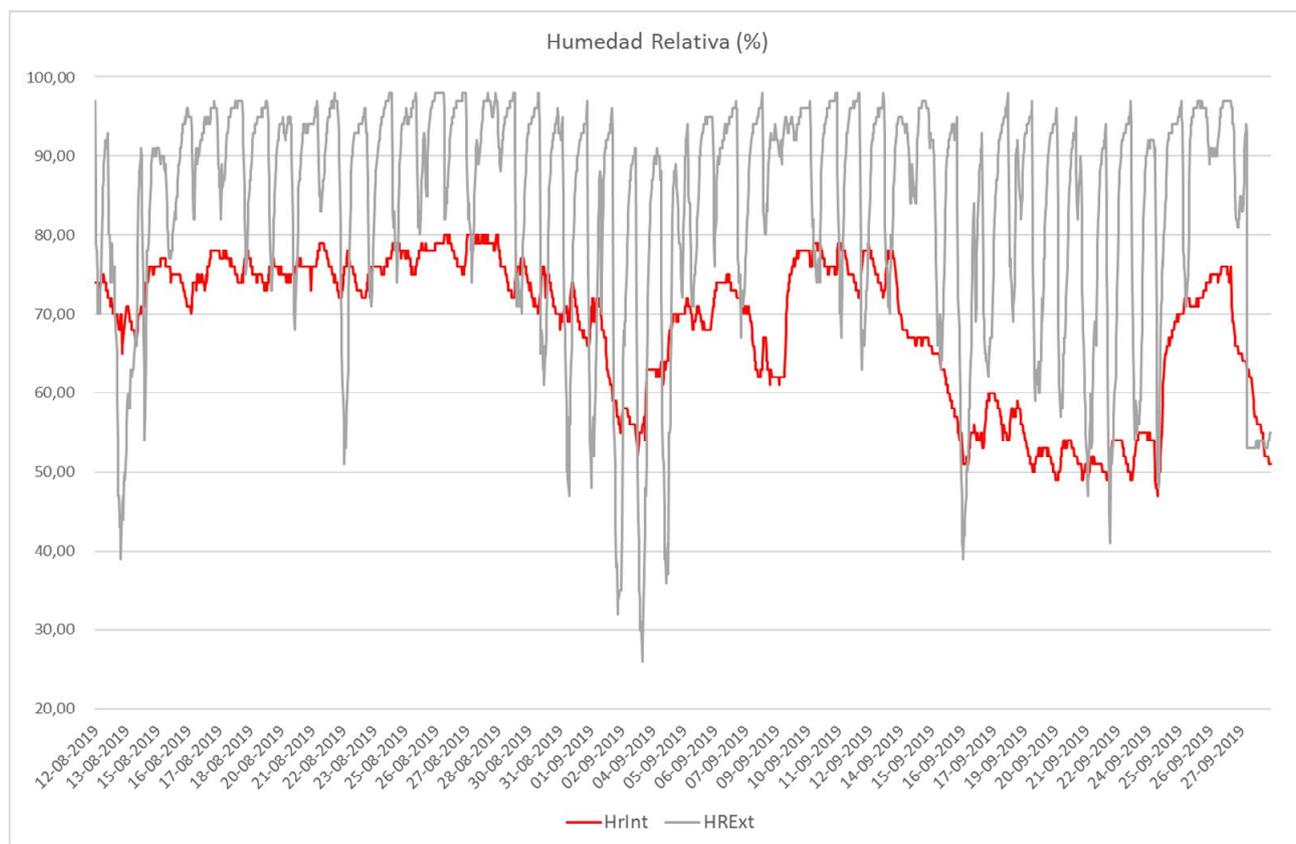


Figura N° 82: Humedad relativa ambiental registrada.

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

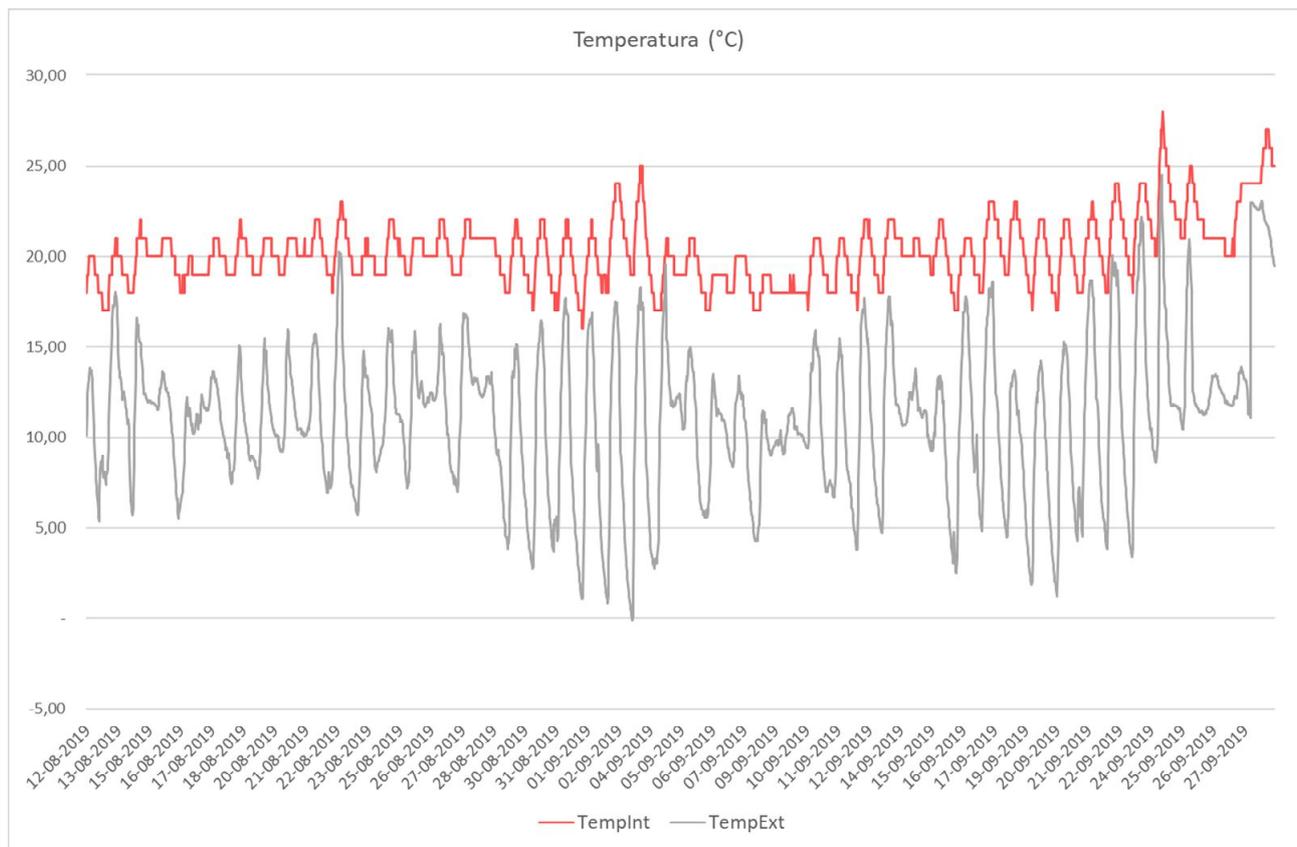


Figura N° 83: Temperatura ambiental registrada.

5.3. REGISTRO DE VARIABLES DEPENDIENTES RESULTANTES

5.3.1. Temperatura superficial interior

Las mediciones, tanto de temperatura superficial como de condensaciones se realizaron desde el 12 de agosto al 27 de septiembre, con intervalos de medición cada 30 minutos. Los cálculos teóricos de condensación y formación de moho se realizaron sobre los 4 tipos de recubrimiento y en las 2 secciones de cada uno (puente térmico y aislante).

A continuación se detalla cada punto del muro ensayado donde se midió la temperatura superficial y su relación con el revestimiento y sección:

Tabla N° 23: Identificación del revestimiento y sección de las temperaturas superficiales registradas.

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

Revestimiento	PM Vinilizado	PM Vinilizado	EA Común	PM Común	EA "antimoho"	EA Común	PM Común	EA "antimoho"
Sección	A	PT	A	PT	PT	PT	A	A
Identificación	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8

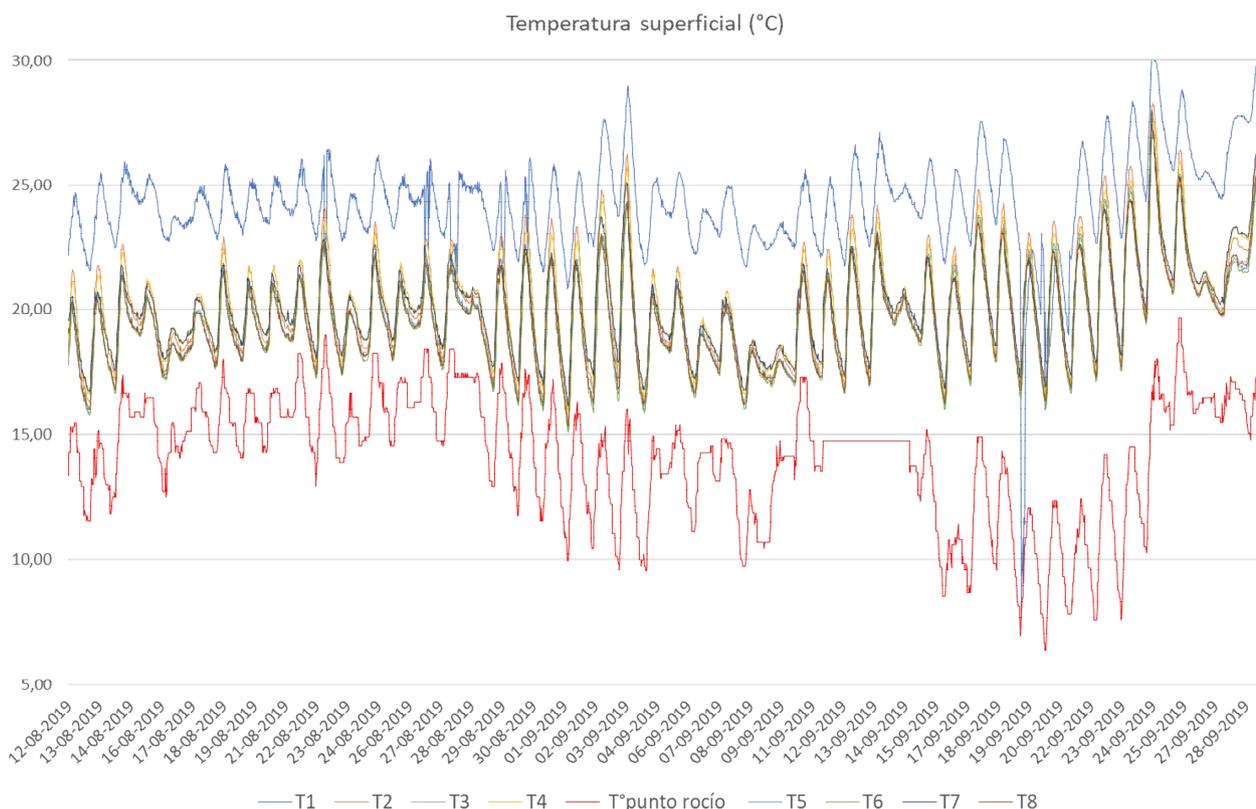


Figura N° 84: Temperaturas superficiales registradas.

5.3.2. Registro de condensación superficial

A continuación, se detalla cada punto del muro ensayado donde se registró la ocurrencia de condensaciones y su relación con el revestimiento y sección:

Tabla N° 24: Identificación del revestimiento y sección de las condensaciones superficiales registradas.

Revestimiento	PM Vinilizado	PM Vinilizado	EA Común	PM Común	EA "antimoho"	EA Común
Sección	A	PT	A	A	A	PT
Identificación	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

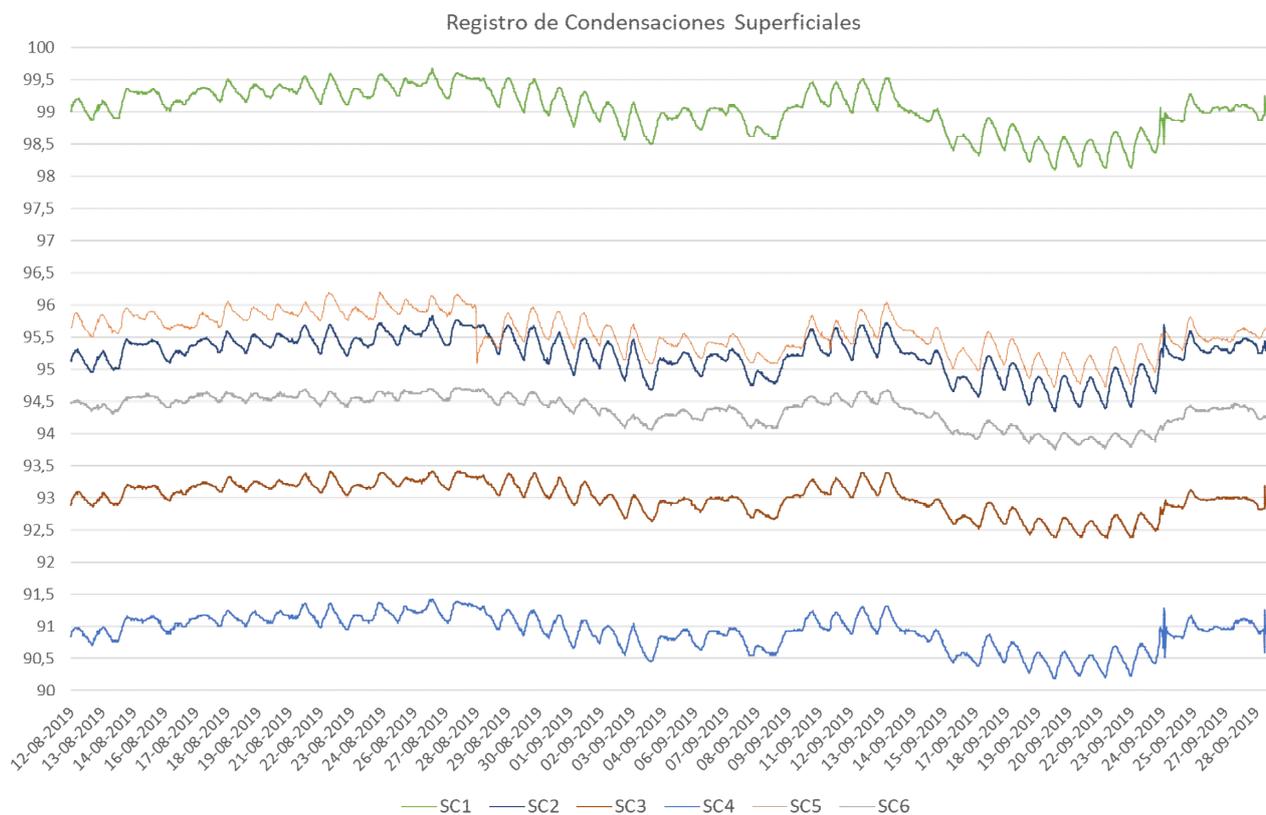


Figura N° 85: Condensaciones superficiales registradas, periodo completo.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. CALCULO ESTÁTICO CON HERRAMIENTA DITEC

El cálculo estático se refiere sólo a un periodo específico durante el cual se presenta la humedad relativa y temperatura ambiental ambiente interior y exterior del clima de la localidad evaluada. El fin de esta cálculo es determinar la ocurrencia de condensaciones superficiales e intersticiales, lo cual según lo revisado en la literatura existente, no significa necesariamente que se formará moho.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de los resultados del cálculo estático de cada uno de los 4 revestimientos de terminación utilizados:

Tabla N° 25: Resumen evaluación de condensaciones superficiales e intersticiales

Ítem	Variable	Un.	Material de la última capa			
			Esmalte al agua común	Papel mural vinilizado	Esmalte al agua "antimoho"	Papel mural común
1	Espesor última capa	mm	0,020	0,500	0,020	0,250
2	Sd última capa	m	2,540	2,450	0,100	1,225
3	Condensación superficial	-	NO	NO	NO	NO
4	Conclusión planilla DITEC	-	NO SE PRESENTA riesgo de condensación SUPERFICIAL			
5	Condensación intersticial	-	SI	SI	SI	SI
6	HR interior crítica	%	53	53	50	51
7	Cantidad de interfaces de condensación	-	12	12	12	12
8	Conclusión planilla DITEC	-	NO SE DISMINUYE el riesgo de condensación INTERSTICIAL	NO SE DISMINUYE el riesgo de condensación INTERSTICIAL	NO SE DISMINUYE el riesgo de condensación INTERSTICIAL	NO SE DISMINUYE el riesgo de condensación INTERSTICIAL
9	Formación de moho	-	?	?	?	?

Notas:

- Periodo de evaluación: estático, se evalúa un momento del año cuando se cumple la humedad relativa y temperatura ambiental ingresadas.
- Espesor y Sd corresponde a los datos de los materiales y se ingresan directamente en la hoja de cálculo DITEC.
- Resultado de condensaciones superficiales se obtiene desde la comparación de los factores de resistencia superficial, se realiza en la hoja de cálculo entregando solo el resultado no numérico.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Ítems 3 al 9 resultados extraídos directamente de la hoja de cálculo DITEC.
- Ítem 9, Formación de moho sería la conclusión del análisis desarrollado.

Como se puede observar, en todos los casos se producen 12 interfases de condensación al interior del muro concluyéndose que no se disminuye el riesgo de condensación intersticial.

El cálculo determina que no se producen condensaciones superficiales en ningún caso, esto lo hace comparando la resistencia térmica del caso base vs. la resistencia térmica total mínima.

El caso más favorable de humedad relativa interior crítica de condensación se presenta en el esmalte al agua común y en el papel mural vinilizado con 53% para sus valores de Sd de 2,54 y 2,45m respectivamente, siendo esos valores también los más altos. El valor de humedad relativa interior crítica de condensación más bajo (más crítico) se produce en el esmalte al agua antimoho con un 50% consecuente con el valor de Sd también más bajo de 0,1m.

En base a los resultados del muro investigado se puede concluir que mientras más alto sea el valor de Sd de la última capa, mayor y más favorable será el valor de humedad relativa interior crítica. Por su parte, la cantidad de interfases de condensación no varían entre los diferentes valores de Sd.

6.2. CÁLCULO DINÁMICO

Para poder entender los resultados obtenidos a través de las simulaciones dinámicas se deben considerar las condiciones de borde adoptadas, las cuales se detallan en Anexo 4 para cada material, capa y corte constructivo en general.

A continuación se analizan los resultados obtenidos para cada variable y luego se realiza un análisis de sensibilidad que permita identificar las variables claves al momento de desarrollar una simulación dinámica con las herramientas utilizadas en esta investigación.

Contenido de agua

Como se puede ver en las figuras de contenido de agua durante los 3 años de evaluación, si bien no se observa mayor diferencia de valores entre los 4 revestimientos, se puede concluir que al término del periodo de evaluación es la solución constructiva con esmalte al agua común (EAC) la que contiene menos agua, siendo a su vez la solución constructiva con esmalte al agua antimoho (EAA) la que contiene más agua.

Al comparar los contenidos de agua de la capa subyacente a los revestimientos de terminación evaluados, el yeso cartón, se observa la misma relación, siendo el esmalte al agua común el que contiene menos agua al término del periodo de evaluación.

Al evaluar las fluctuaciones del contenido de agua durante los 3 años de evaluación se puede ver que en todos los casos después de los primeros 6 meses estas se regularizan y se asocian a las fluctuaciones del contenido de agua del ambiente. Sin embargo se puede observar que las fluctuaciones del EAC son las menos variables y las del EAA, seguidas del PMV son las más variables.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

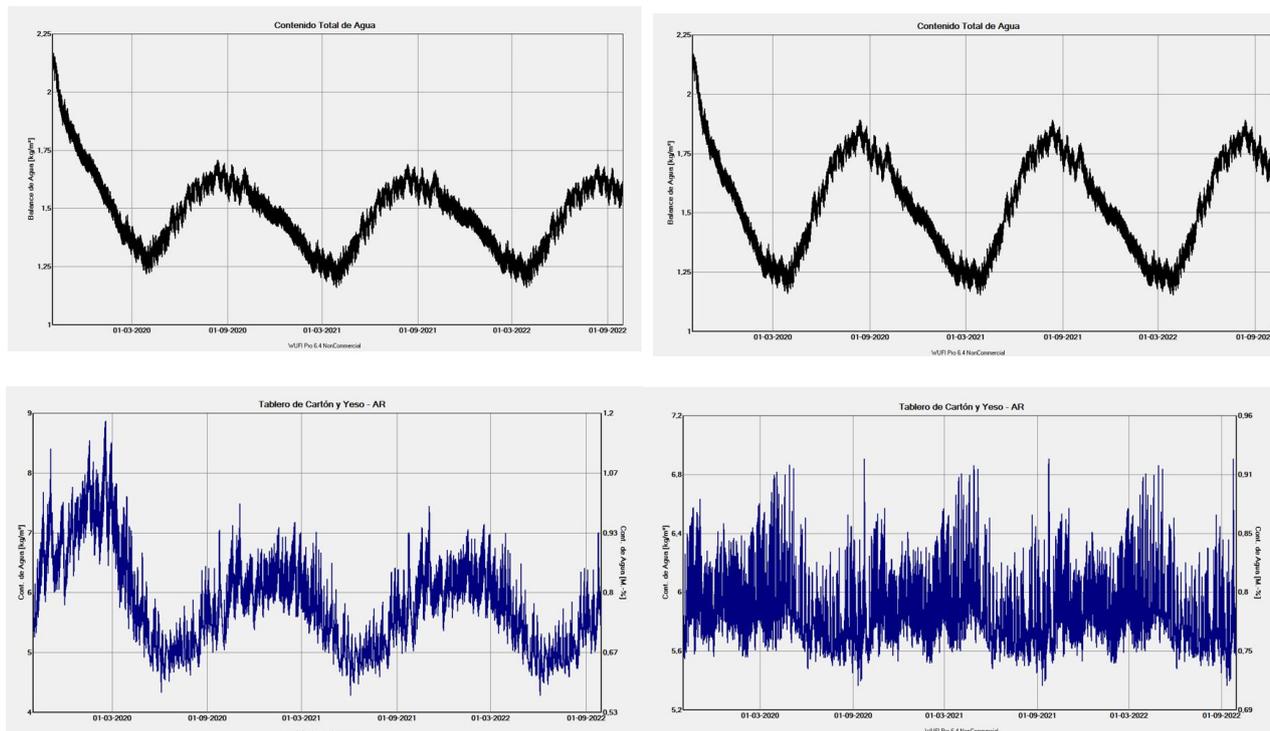


Figura N° 86: Contenido de agua total (arriba) y de la capa de yeso cartón (abajo) para EAC (izquierda) y EAA (derecha). Como se puede apreciar en el gráfico, el contenido de agua fluctúa de manera diferenciada entre los 4 tipos de revestimientos. Las fluctuaciones diarias incluso se hacen más notorias en la placa de yeso cartón para el esmalte al agua antimoho (EAA). El resultado entonces indica que la solución constructiva revestida con esmalte al agua común permite un menor contenido de agua y además presenta menos fluctuaciones de este contenido durante el tiempo, para el total de las capas y para la capa subyacente (yeso cartón).

Isopletas

Al evaluar el gráfico de Isopletas se puede observar una similitud entre los revestimientos EAA, PMV y PMC donde en todos los casos se concentra la humedad relativa traspasando los límites para la formación de moho hasta el segundo año, llegando hasta el LIM B II (curva isopleta para la formación de moho más baja) a excepción del EAA que levemente llega hasta el LIM B I. Por su parte el EAC llega hasta el LIM B II durante incluso el tercer año evaluado siendo por lo tanto este caso el más crítico o el con más riesgo de formación de moho.

Dicho de otro modo, el esmalte al agua común (EAC) presentará crecimiento de moho hasta el tercer año ya que las humedades relativas críticas asociadas superan la curva de isopletas para el grupo de sustrato II correspondiente a materiales con estructura porosa como es el caso evaluado. Por su parte el esmalte al agua antimoho (EAA) es el que posee el mejor resultado ya que el riesgo solo se extiende hasta el segundo año traspasando solo la curva de LIM B I que correspondería a materiales biológicos.

Tasa de crecimiento de moho

A continuación se puede observar un gráfico comparativo de las tasas de crecimiento de moho de las 4 secciones estudiadas:

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

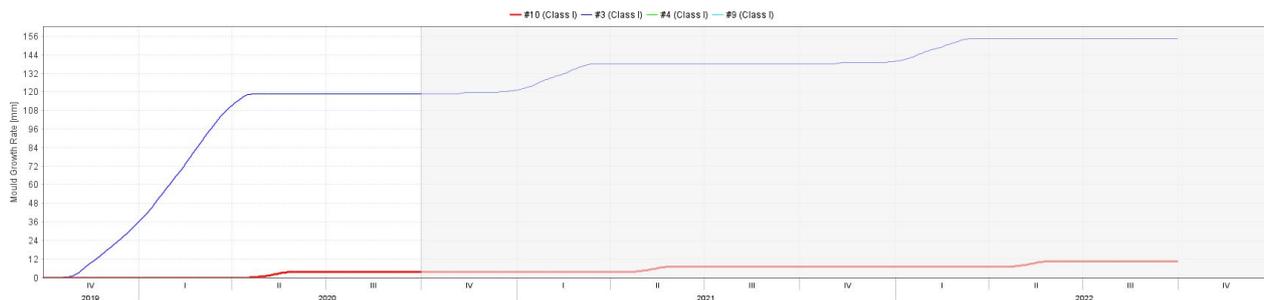


Figura N° 87: Comparación de las tasas de crecimiento del moho (mm).

Azul: Caso 1 (EAC) Verde: Caso 2 (PMV) Celeste: Caso 3 (EAA) Rojo: Caso 4 (PMC)

Como se puede observar, la tasa de crecimiento mayor es la del esmalte al agua común (EAC) durante todo el periodo de evaluación y específicamente de 119 mm en el primer año, superando con creces al resultado de los demás revestimientos.

Por su parte el esmalte al agua antimoho (EAA) resulta con tasa de crecimiento de 0 mm siendo por tanto el caso evaluado más favorable.

Índice de moho

Al evaluar el resultado de formación de moho con este índice se presentan resultados similares a la tasa de crecimiento, siendo el esmalte al agua común (EAC) nuevamente el de peor resultado durante el periodo evaluado con un índice para el primer año de 0,399. Al igual que la tasa de crecimiento, el índice de crecimiento de moho para el esmalte al agua antimoho (EAA) es 0.

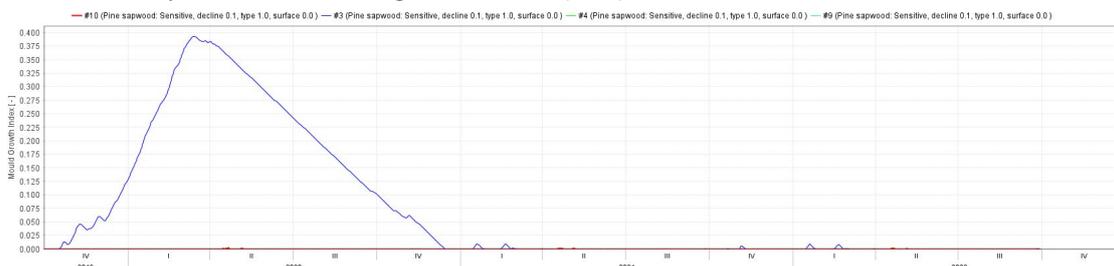


Figura N° 88: Índice de moho (-).

Azul: Caso 1 (EAC) Verde: Caso 2 (PMV) Celeste: Caso 3 (EAA) Rojo: Caso 4 (PMC)

Análisis comparativo

Para poder visualizar de mejor forma lo ya descrito, y otras comparaciones, se presenta el siguiente cuadro comparativo de la simulación dinámica realizada con el software WUFI sobre la solución constructiva tipo y cada uno de sus cuatro revestimientos.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla N° 26: Cuadro comparativo simulación dinámica de los revestimientos evaluados.

Ítem	Variable	Un.	Material de la última capa			
			Esmalte al agua común	Papel mural vinilizado	Esmalte al agua "antimoho"	Papel mural común
1	Espesor última capa	mm	0,020	0,500	0,020	0,250
2	Sd última capa	m	2,540	2,450	0,100	1,225
3	Convergencias	N°	1	0	8	3
4	Equilibrio	kg/m ²	-0,530	-0,440	-0,410	-0,410
5	Contenido de agua total	kg/m ²	1,620	1,720	1,740	1,740
6	Contenido de agua yeso cartón	kg/m ²	5,510	5,600	5,650	5,620
7	Crecimiento de moho (Isopletes)	-	si	si	si	si
8	Curva límite (Isopletes)	-	LIM B II	LIM B II	LIM B I	LIM B II
9	Tiempo (Isopletes)	año	hasta el 3° año	hasta el 2° año	hasta el 2° año	hasta el 2° año
10	Radio de crecimiento	mm/año	119,00 	3,60 	0,00 	3,46 
11	Índice de crecimiento de moho	- /año	0,399 	0,011 	0,000 	0,017 
12	Formación de moho	-	SI	NO	NO	NO

Notas:

- Periodo de evaluación: 3 años, según criterio Fraunhofer Institut y análisis.
- Convergencias: del cálculo realizado, debe ser menor a 14. Criterio Fraunhofer Institut.
- Equilibrio: del agua en el corte constructivo, debe ser menor a 0,55 kg/m². Criterio Fraunhofer Institut.
- Contenido de agua: Al final del periodo de evaluación.
- Radio o tasa de crecimiento referida al primer año de evaluación.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Índice de crecimiento de moho del primer año de evaluación.
- Formación de moho como conclusión del análisis desarrollado.

6.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

De modo de valorar la influencia de los parámetros de entrada y/o características de los materiales y ambiente utilizados en la simulación dinámica se realiza un análisis de sensibilidad, en base al caso más desfavorable (esmalte al agua común o EAC). Estas variaciones se realizan en los datos de entrada de cada una de las herramientas utilizadas: WUFI Pro, WUFI Bio y WUFI VTT.

Las variaciones realizadas sobre el caso base (EAC) para cada caso se detallan a continuación:

Caso A: Se modifica el valor de Sd de la última capa de 2,54 a 0,1m.

Caso B: Se modifica la humedad inicial de construcción de “típica de construcción” calculada por el software a fija al 50%.

Caso C: Se modifica la condición ambiental interior de clase de humedad 4 a 5.

Caso D: Se modifica la clase de sustrato de tipo I (materiales de origen biológico como papel y algunos aislantes) a tipo II (materiales con estructura porosa).

Caso E: Cambio de la clase de exposición de ocupantes de ASHRAE 160 a “superficie interior en contacto con aire interior”.

Caso F: Cambio en la clase de sensibilidad del material de “sensitivo” a “muy sensitivo”.

Caso G: Cambio de clase de material de “disminución relevante” a “disminución significativa”.

Caso H: Modificación del estado de la superficie de “limpia” a “sucia”.

Caso I (F+G+H): Variaciones simultáneas F, G y H. Caso que combina una sensibilidad del material muy sensitivo, una clase de material con disminución significativa y con superficie sucia.

A continuación se presentan las figuras con los resultados que se modifican respecto al caso base, como el índice de crecimiento de moho, el detalle de los resultados se adjuntan en el Anexo 3.

Caso A:

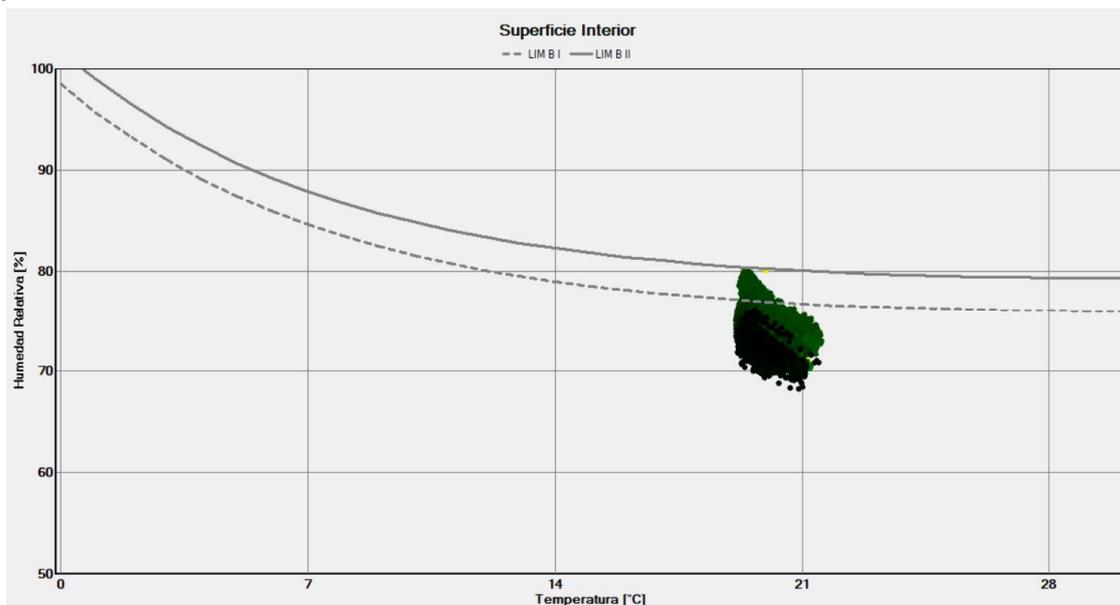


Figura N° 89: Isopletas de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM_{bau}) Caso A.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

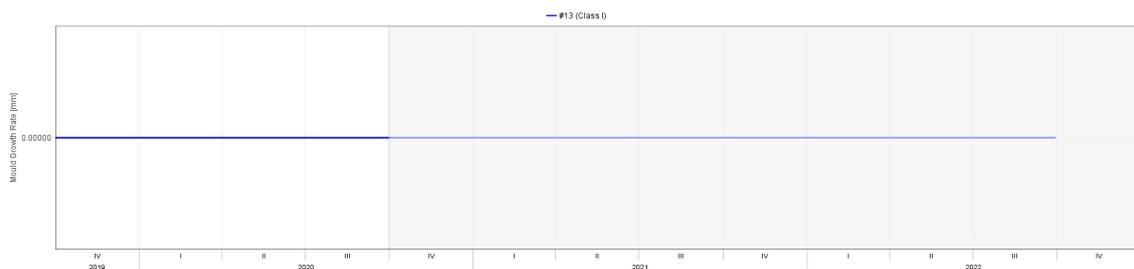


Figura N° 90: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso A.

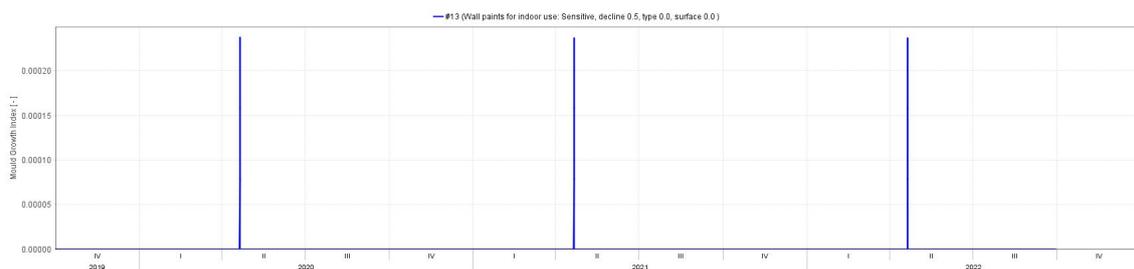


Figura N° 91: Índice de moho (-) Caso A.

La modificación realizada de valor del espesor equivalente de aire del revestimiento (S_d) de 2,54 a 0,1m afecta directamente con la formación de moho resultando isopletas bajo el LIM_{bau} II. No se prevé formación de moho al resultar el radio o tasa de crecimiento e índice de moho igual a 0.

Caso B

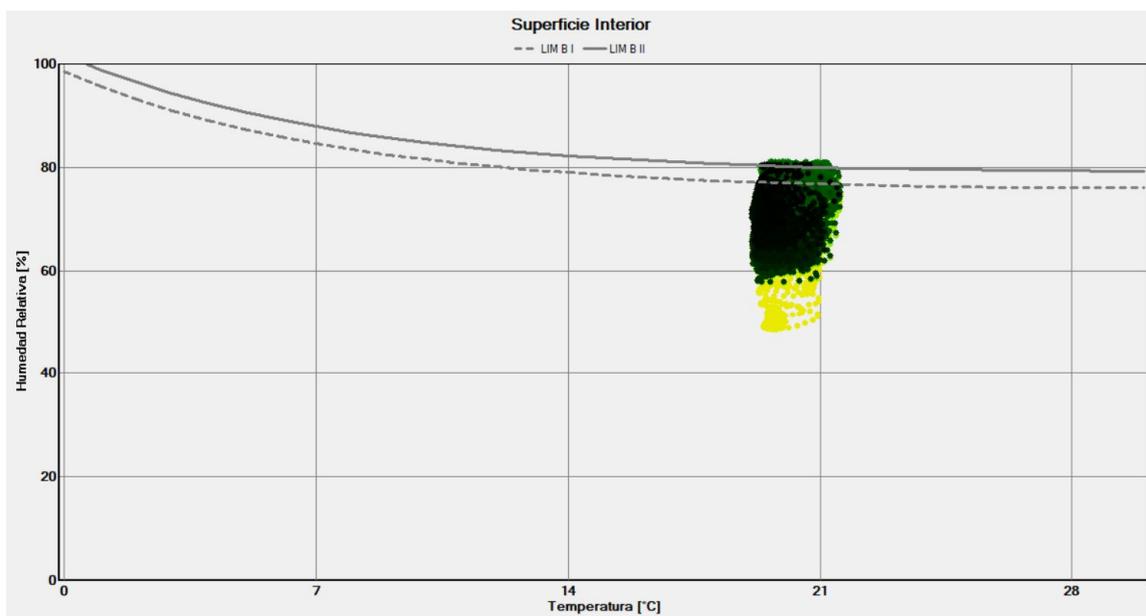


Figura N° 92: Isopletas de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM_{bau}) Caso B.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

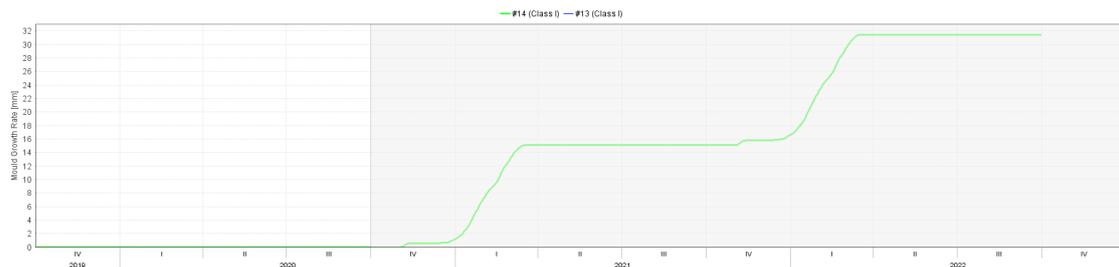


Figura N° 93: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso B.

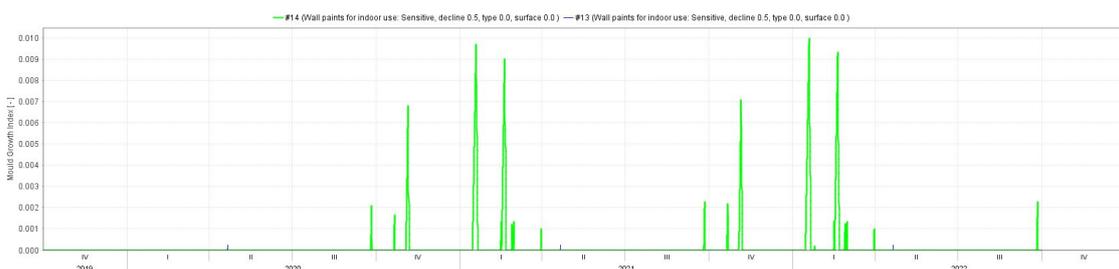


Figura N° 94: Índice de moho (-) Caso B.

La humedad inicial de construcción fijada en 50% afecta de manera directa reduciendo la posibilidad de formación de moho, el resultado es muy similar al caso A manteniéndose la tasa de crecimiento de moho en 0 y resultando el índice de crecimiento de moho de 0,01, sin riesgo de formación de moho.

Caso C

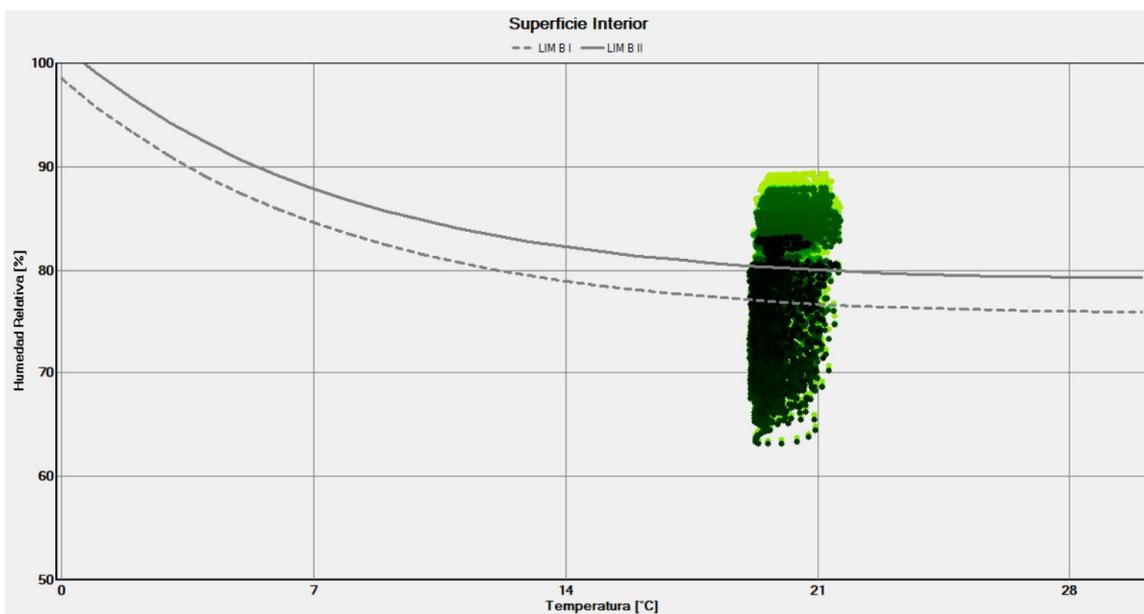


Figura N° 95: Isopletas de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM_{bau}) Caso C.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

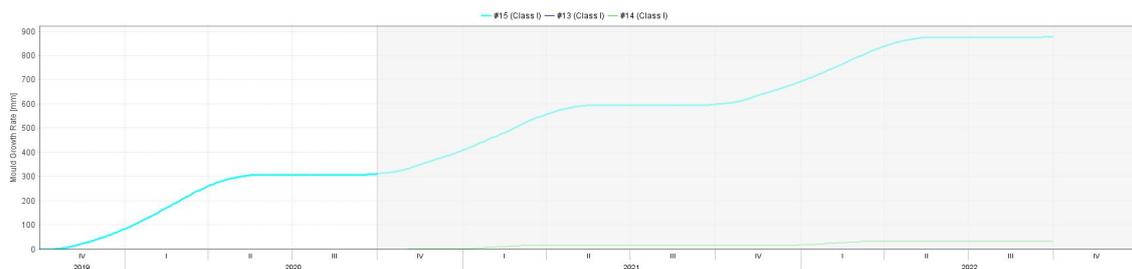


Figura N° 96: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso C.

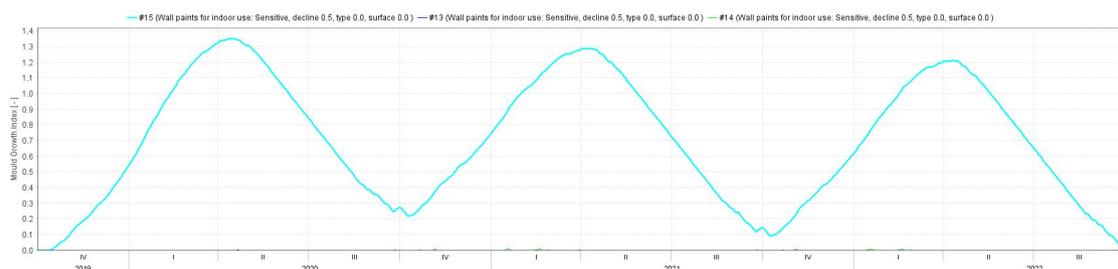


Figura N° 97: Índice de moho (-) Caso C.

El cambio de la clase higrotérmica de 4 a 5, es decir un nivel de humedad relativa interior mayor, afecta directamente en el resultado de la formación de moho. A diferencia de los casos anteriores, esto provoca un aumento notable en la tasa de crecimiento de moho, de 119 a 310mm/año resultando un semáforo rojo y con eso un crecimiento seguro de moho.

Caso D

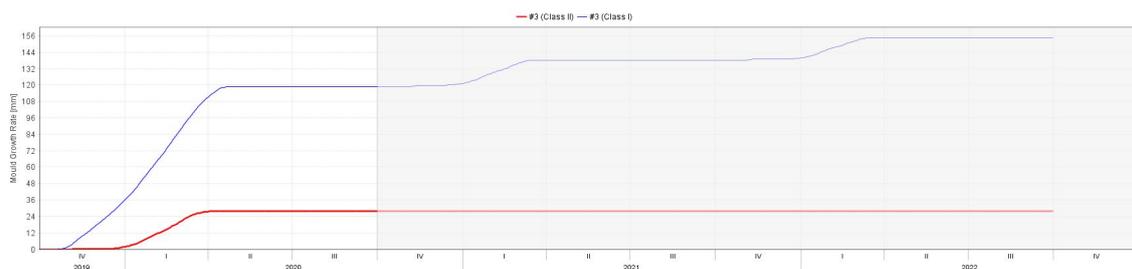


Figura N° 98: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso D.

Como se observa, la variación de la clase de sustrato del tipo materiales de origen biológico al tipo materiales con estructura porosa modifica la tasa de crecimiento de moho de 119 a 27,7mm/año resultando ya un semáforo verde, es decir menos de 50mm/año considerado como un nivel aceptable.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Casos E, F, G, H e I (F+G+H)

Las variaciones realizadas en estos casos se ejecutan en el software WUFI VTT con lo cual solo se obtiene una variación en el gráfico del índice de crecimiento de moho. A continuación, se presenta la curva del índice mencionado para el primer año de estos casos:

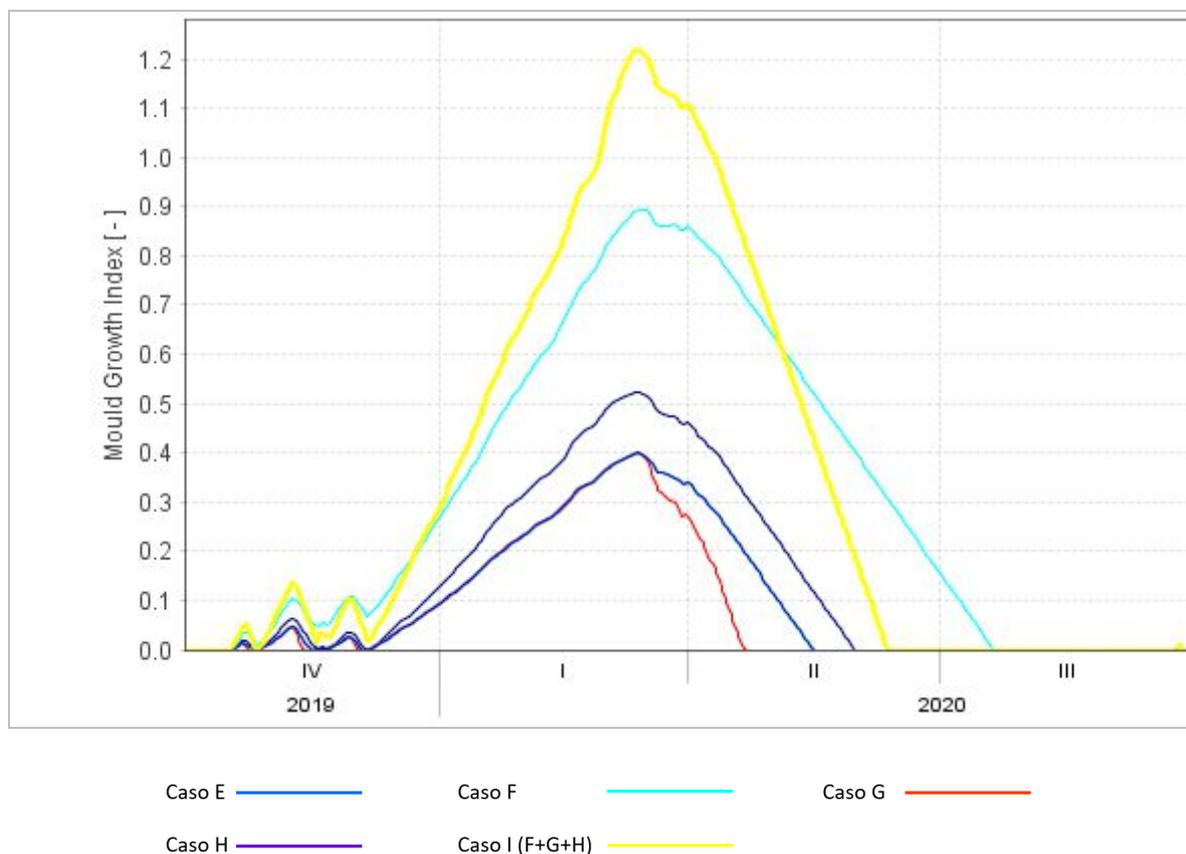


Figura N° 99: Comparación de índices de crecimiento de moho.

Dentro de las variaciones de las condiciones de borde en WUFI Pro, que es el modelo base, se observa que el caso C (cambio de clase higrótérmica o aumento de humedad relativa interior) es el parámetro que afecta más a la formación de moho. Esto se puede visualizar en el siguiente gráfico que representa la variación de la tasa de crecimiento de moho a partir del caso base.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

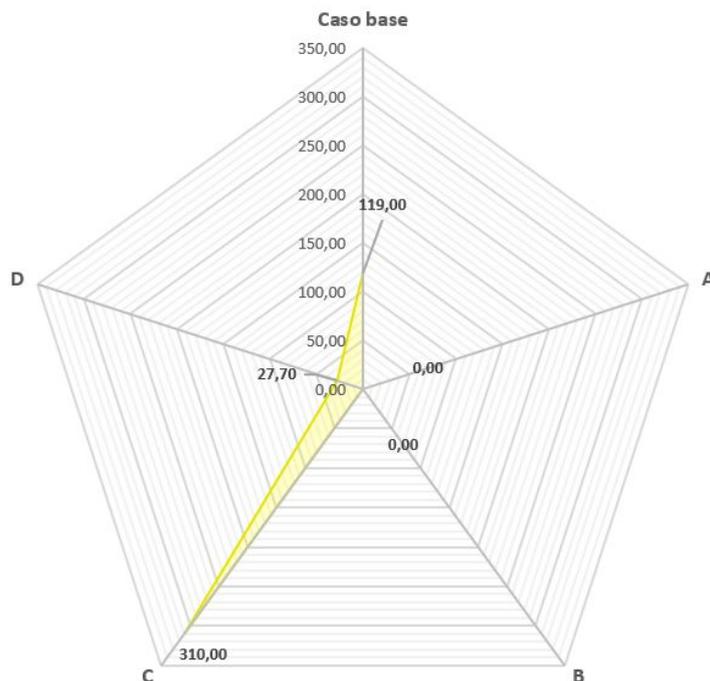


Figura N° 100: variación de la tasa de crecimiento de moho, parámetros de WUFI Pro.

En la siguiente figura se puede apreciar la variación del índice de crecimiento de moho para todos los casos donde se observa que después de la variación de las condiciones ambientales interiores (caso C), el caso con las variaciones simultáneas en las características del material de la primera capa interior (caso I) es el que resulta más alto.

Si se considera solo una modificación individual de la característica del material de la primera capa interior, y no la suma de, es el caso F el que posee el valor más alto de índice de crecimiento de moho con el cambio en la clase de sensibilidad del material.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

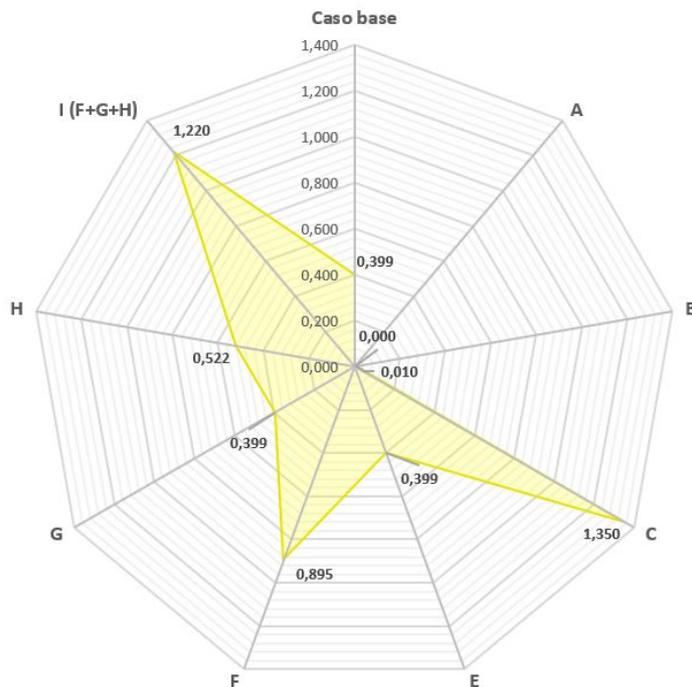


Figura N° 101: variación del índice de crecimiento de moho, parámetros de WUFI Pro, WUFI Bio y WUFI VTT.

Para una mejor visualización de los resultados analizados se presenta a continuación una matriz de resumen con los datos de entrada parámetros modificados variados y los resultados obtenidos, en rojo los valores modificados.

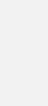
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla N° 27: matriz de resumen de datos de entrada variados y resultados obtenidos casos base, A, B y C.

Ítem	Variable	Un.	Análisis de sensibilidad			
			Caso base	A	B	C
1	Fuente	-	-	Pro	Pro	Pro
2	Espesor última capa	mm	0,020	0,020	0,020	0,020
3	Sd última capa	m	2,540	0,100	2,540	2,540
4	Humedad inicial de construcción	%	típica de constr,	típica de constr,	50	típica de constr,
5	Clase de humedad	-	4	4	4	5
6	Convergencias	N°	1	8	1	0
7	Equilibrio	kg/m ²	-0,530	-0,410	0,440	-0,320
8	Contenido de agua total	kg/m ²	1,620	1,740	1,620	1,830
9	Contenido de agua yeso cartón	kg/m ²	5,510	5,650	5,510	6,340
10	Crecimiento de moho (Isopletes)	-	si	si	si	si
11	Curva límite (Isopletes)	-	LIM B II	LIM B I	LIM B II	LIM B II
12	Tiempo (Isopletes)	año	hasta el 3° año	hasta el 2° año	hasta el 3° año	hasta el 3° año
13	Radio de crecimiento (Bio)	mm/año	119,00 	0,00 	0,00 	310,00 
14	Índice de crecimiento de moho (VTT)	- /año	0,399 	0,000 	0,010 	1,350 
15	Formación de moho	-	SI	NO	NO	SI

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla N° 28: matriz de resumen de datos de entrada variados y resultados obtenidos casos base, D, E, F, G, H y I (F+G+H).

Ítem	Variable	Un.	Análisis de sensibilidad						
			Caso base	D	E	F	G	H	I (F+G+H)
1	Fuente	-	-	Bio	VTT	VTT	VTT	VTT	VTT
2	Clase de sustrato	-	I	II	I	I	I	I	I
3	Clase de exposición de ocupantes	-	ASHRAE 160	ASHRAE 160	superficie interior en contacto con aire interior	ASHRAE 160	ASHRAE 160	ASHRAE 160	ASHRAE 160
4	Clase de sensibilidad material	-	Sensitivo	Sensitivo	Sensitivo	Muy sensitivo	Sensitivo	Sensitivo	Muy sensitivo
5	Clase de material	-	disminución relevante	disminución relevante	disminución relevante	disminución relevante	disminución significativa	disminución relevante	disminución significativa
6	Estado de la superficie	-	limpia	limpia	limpia	limpia	limpia	sucia	sucia
7	Radio de crecimiento (Bio)	mm/año	119,00 	27,70 	- 	- 	- 	- 	- 
8	Índice de crecimiento de moho (VTT)	- /año	0,399 	- 	0,399 	0,895 	0,399 	0,522 	1,220 
9	Formación de moho	-	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI

6.4. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONDENSACIÓN Y FORMACIÓN DE MOHO

Ambiente interior:

El registro climático observado en la variación de la humedad relativa que del periodo evaluado, del 12 de agosto al 27 de septiembre de 2019, es de entre 70 y 80% con periodos que llegan hasta el 50%. Es así que la mayor parte del tiempo se puede clasificar la higrometría interior en clase 4, consecuente con las condiciones de humedad relativa interior consideradas en las simulaciones dinámicas.

La temperatura ambiental interior se mantuvo entre 18 y 22°C, es decir dentro del confort ambiental esperable de una vivienda tipo.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Temperaturas superficiales:

Como se pudo ver, las temperaturas superficiales variaron proporcionalmente a la temperatura ambiental interior. Se registran algunos puntos singulares donde se presentan condensaciones superficiales teóricas en la situación en la que la temperatura superficial registrada es menor o igual a la temperatura superficial de rocío.

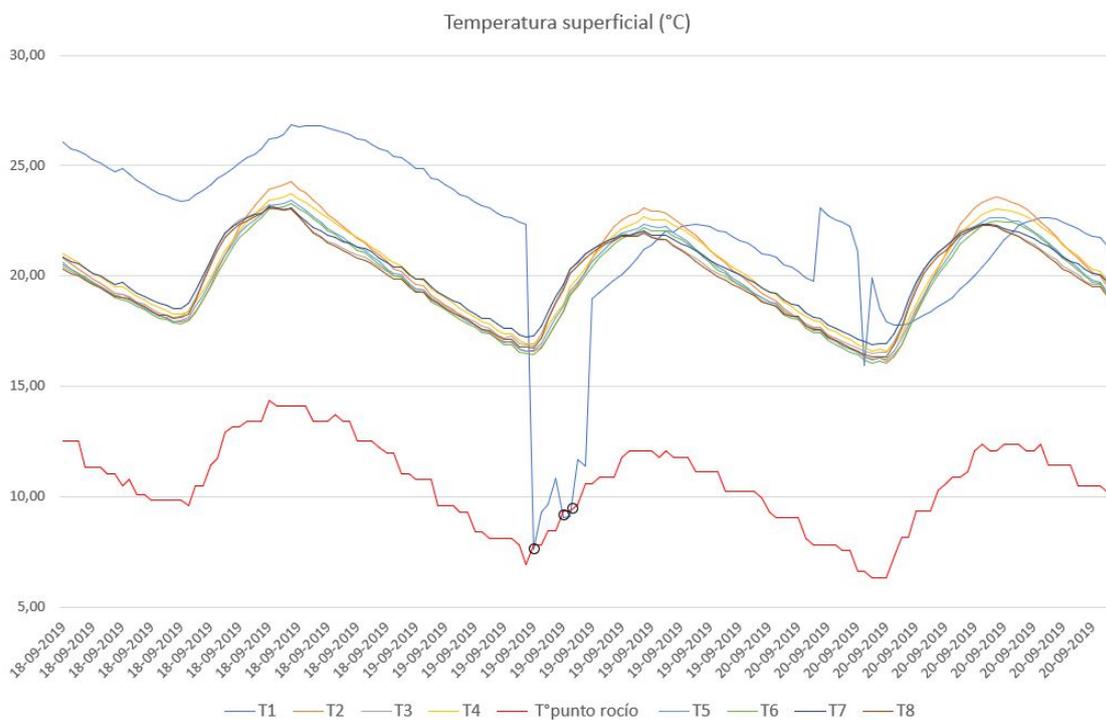


Figura N° 102: Temperatura superficial interior vs. temperatura punto de rocío

Como se puede ver en la figura anterior, la temperatura superficial interior T1, correspondiente al papel mural vinilizado (PMV) traspasa la curva de temperatura de punto de rocío en 3 puntos. Si se analiza esa intersección se puede ver que se produce el 19 de septiembre donde efectivamente la temperatura superficial interior del papel mural vinilizado (T1) está por debajo de la temperatura de rocío con lo cual, al menos teóricamente, se produce condensación superficial.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

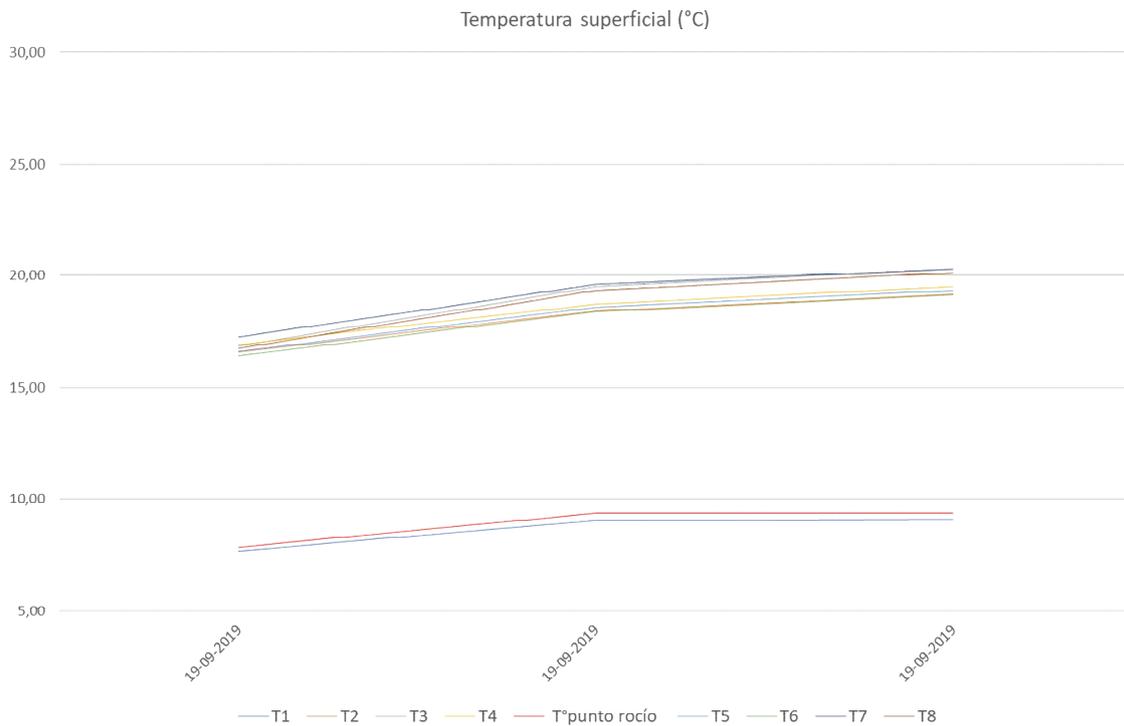


Figura N° 103: Detalle de tres días de temperaturas superficial interior y de punto de rocío

Se puede observar que los demás registros no están por debajo del punto de rocío lo cual puede llevar a concluir que se produce condensación superficial solo en el revestimiento PMV. Para corroborar esto se deberían realizar más estudios que permitan comprobar los valores obtenidos.

Registro de condensación superficial

El registro de condensaciones superficiales con hoja sobre la superficie interior permite evaluar en detalle las fechas donde teóricamente se produce condensación superficial, el 19 de septiembre.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

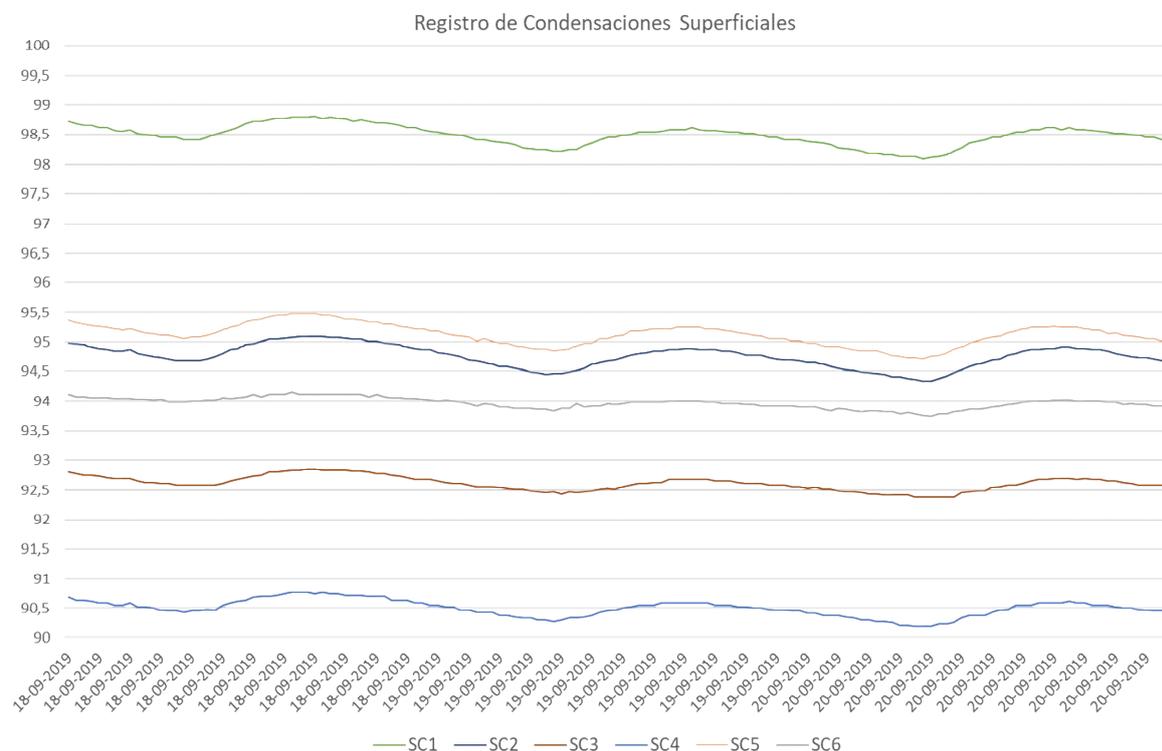


Figura N° 104: Registro de condensaciones superficiales del periodo en detalle

Como se puede observar no se produce ningún diferencial importante entre las fechas revisadas. Se podría concluir que las condensaciones calculadas a partir del registro de temperaturas superficiales no se conciben con las condensaciones registradas por las hojas superficiales.

Sin embargo, con fecha 28 de agosto un diferencial de valor 1,0 en el revestimiento de esmalte al agua antimoho (EAA). Este diferencial es el más significativo de todo el periodo entre datos consecutivos.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

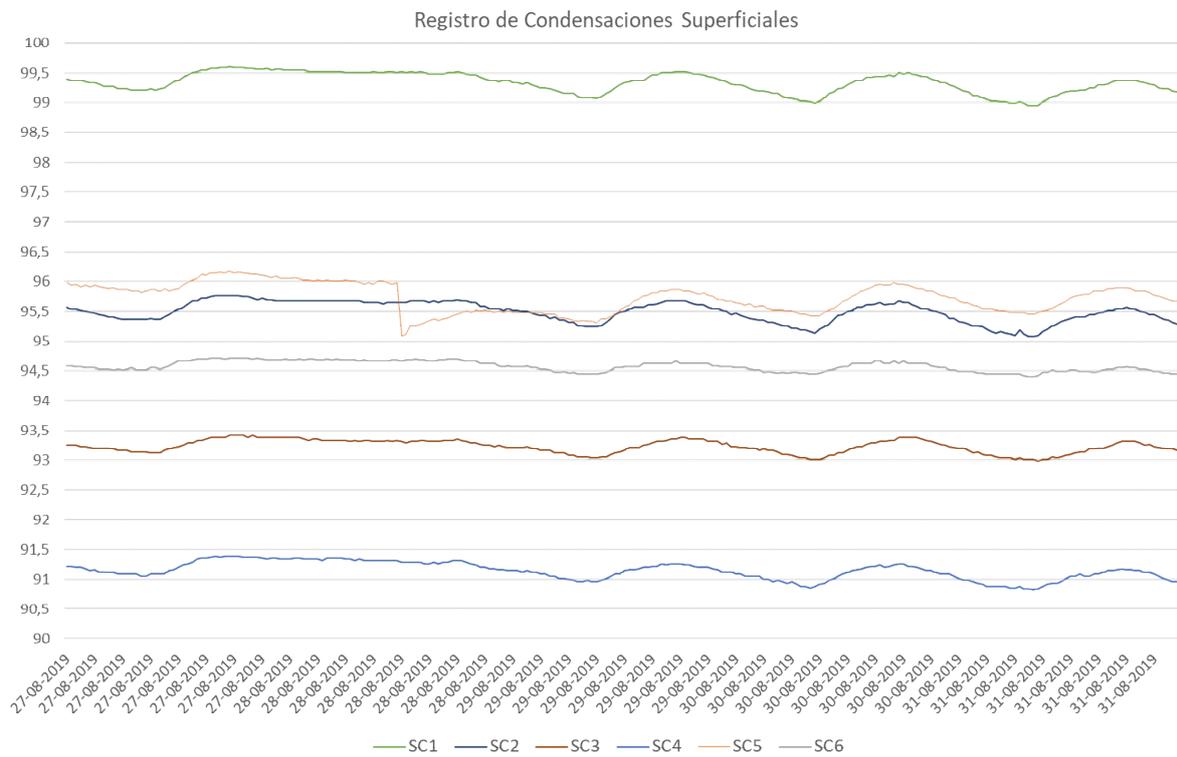


Figura N° 105: Registro de condensaciones superficiales del periodo en detalle

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

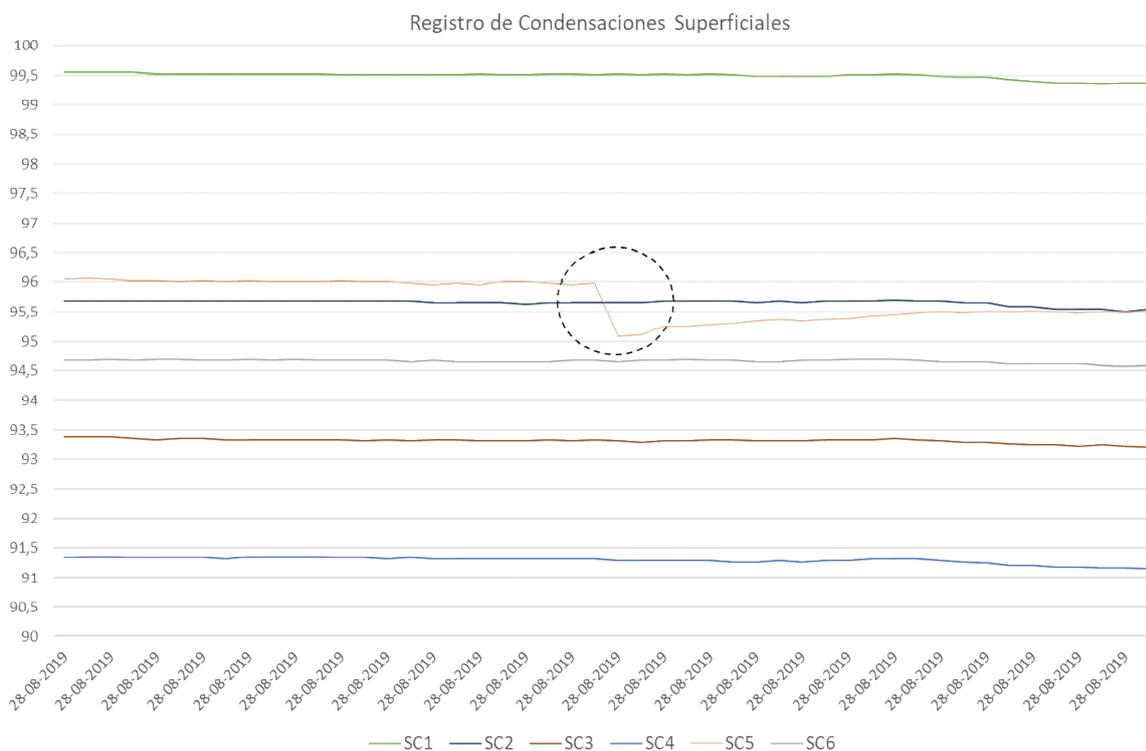


Figura N° 106: Registro de condensaciones superficiales del periodo en detalle

Sin embargo no se puede concluir que en es fecha se producirán necesariamente condensaciones superficiales, principalmente porque según lo revisado en la figura 82 se requiere programar las hojas para que en eventos de condensación superficial se genere una diferencia de al menos 200, lo cual no se produce en ningún caso del periodo experimentado.

Ahora bien, si se relaciona el registro de hoja de superficie interior con la humedad relativa interior se puede encontrar una directa relación.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

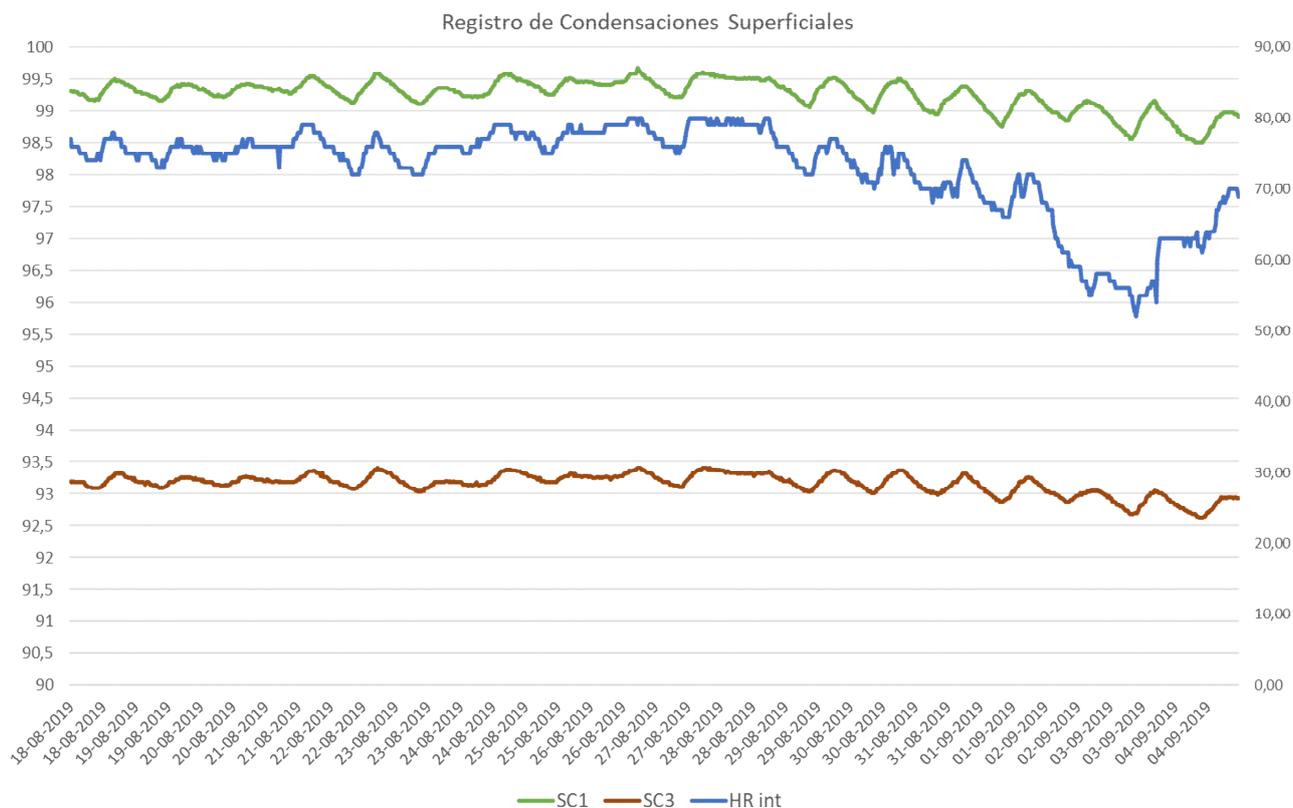


Figura N° 107: Registro de condensaciones superficiales vs. humedad relativa interior

Al calcular la varianza de todos los registros de condensaciones superficiales se concluye que la de mayor varianza es la curva del SC1 (PMV) seguida muy de cerca por SC5 (EAA) y la de menos es la curva del SC3 (EAC), las cuales reaccionan de manera diferente ante las fluctuaciones de humedad relativa interior.

Para ejemplificar esto se opta por comparar el periodo del 18 al 20 de agosto de 2019 donde se pueden visualizar las fluctuaciones de los registros de condensaciones superficiales vs. las fluctuaciones de la humedad relativa interior, siendo la curva SC1 (PMV) la más variable y la curva del SC3 (EAC) la menos variable.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

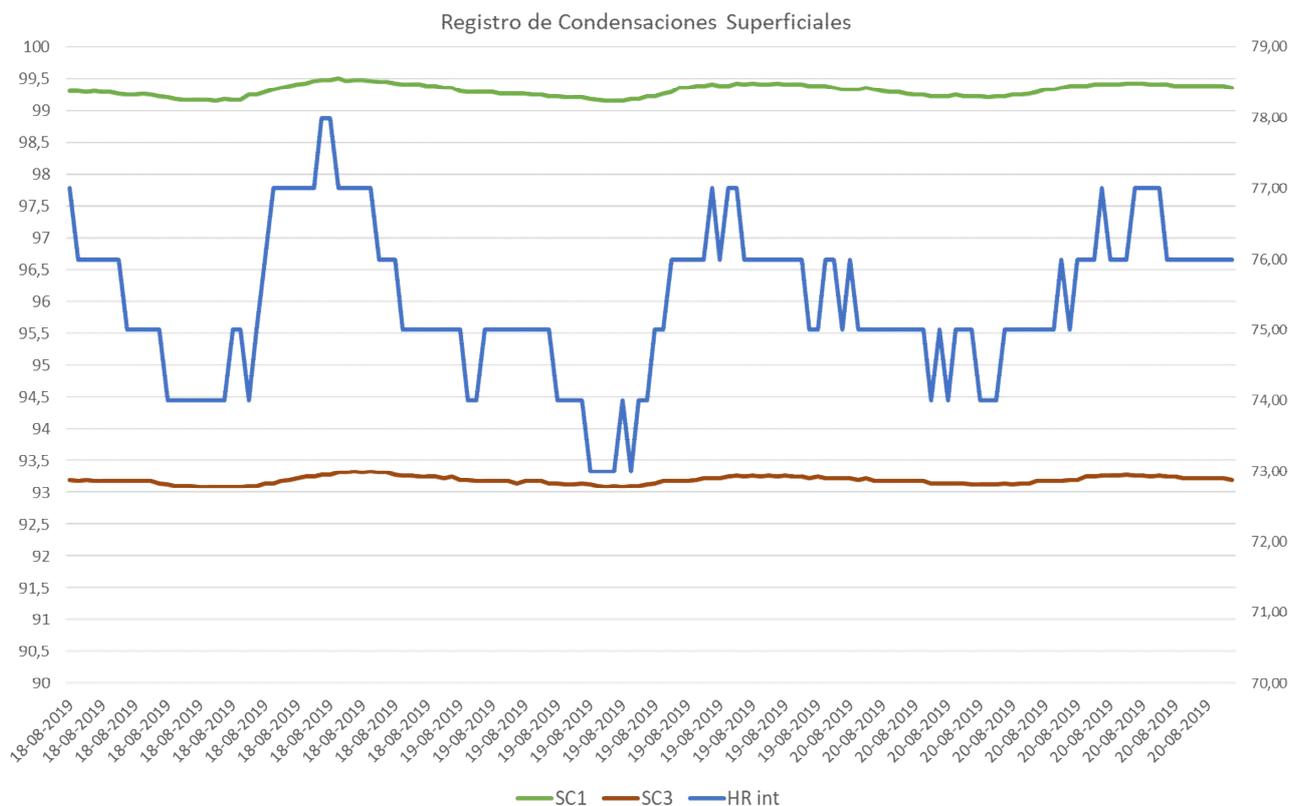


Figura N° 108: Registro de condensaciones superficiales vs. humedad relativa interior en detalle

Lo anterior puede llegar a concluir que el esmalte al agua común presenta un registro de condensaciones con ciclos más cortos, contrario al papel mural vinilizado que presenta ciclos acentuados. Se puede decir que las hojas de registro de condensaciones reaccionan a las variaciones de humedad relativa interior diferenciándose entre los revestimientos. Quizá se puede deber a que el esmalte al agua frena menos el vapor de agua y no lo mantiene en la superficie a diferencia del papel mural vinilizado que al frenar más el vapor de agua mantiene una humedad mayor sobre la superficie que otros revestimientos. Para una mejor visualización a continuación se presenta la tabla de identificación de materiales de última capa o revestimientos según, registros y resultados obtenidos.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla N° 29: Registros y resultados experimento en laboratorio.

Ítem	Variable	Un.	Material de la última capa			
			Esmalte al agua común	Papel mural vinilizado	Esmalte al agua "antimoho"	Papel mural común
1	Identificación temperatura superficial		T3	T1	T8	T7
2	Identificación registro condensación		SC3	SC1	SC5	SC4
3	Espesor última capa	mm	0,020	0,500	0,020	0,250
4	Sd última capa	m	2,540	2,450	0,100	1,225
5	Condensación superficial (sensor temperatura superficial interior)	-	NO	SI ($t_{si}^{\circ} \leq t_{pr}^{\circ}$) ^{*1}	NO	NO
6	Condensación superficial (hoja superficie interior)	-	NO	NO	SI ($\Delta > 1$) ^{*2}	NO
7	Registro visual	-	NO	NO	NO	NO
8	Formación de moho	-	NO	NO	NO	NO

Notas:

- *1: Registro de condensación superficial cuando la temperatura superficial interior es menor a la temperatura de punto de rocío.
- *2: Condensación superficial registrada por la hoja instalada en la superficie interior considerándose una diferencia mayor o igual a 1 entre dos registros consecutivos.
- Formación de moho como conclusión del análisis desarrollado.

6.5. MATRIZ DE RELACIÓN DE VARIABLES

Los resultados de las simulaciones estáticas y dinámicas, y del experimento en laboratorio, si bien se analizaron en el capítulo anterior por separado, hacen referencia al mismo muro tipo con 4 opciones de revestimiento de terminación interior.

A continuación se presenta una matriz de comparación de resultados de los cálculos y evaluaciones experimentales realizadas respecto a las 4 opciones del material de revestimiento de terminación considerado. Además de coparar los resultados obtenidos, se agrega una fila con la conclusión resultante sobre la formación de moho.

Tabla N° 30: Matriz de comparación de resultados de los cálculos y evaluaciones experimentales realizadas

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Ítem	Variable	Fuente	Material de la última capa			
			Esmalte al agua común	Papel mural vinilizado	Esmalte al agua "antimoho"	Papel mural común
1	Periodo total evaluado	-	0,13 años (1.139 horas)			
2	Condensación superficial	Registro sensor t_{si}°	NO	SI ($t_{si}^{\circ} \leq t_{pr}^{\circ}$) *1	NO	NO
3	Periodo correspondiente	Registro sensor t_{si}°	-	1,5 horas (0,13%)	-	-
4	Condensación superficial	Registro hoja superficie interior	NO	NO	SI ($\Delta > 1$) *2	NO
5	Periodo correspondiente	Registro hoja superficie interior	-	-	0,5 horas (0,04%)	-
6	Registro visual	Imágenes SEM	NO	NO	NO	NO
7	Formación de moho	-	NO	NO	NO	NO
8	Periodo total evaluado	-	Cuando HR y t_{ext}° evaluadas se cumplen (2,2% del tiempo)	Cuando HR y t_{ext}° evaluadas se cumplen (2,2% del tiempo)	Cuando HR y t_{ext}° evaluadas se cumplen (2,2% del tiempo)	Cuando HR y t_{ext}° evaluadas se cumplen (2,2% del tiempo)
9	Condensación superficial	f_{Rsi} (herramienta DITEC)	NO	NO	NO	NO
10	Conclusión planilla DITEC	f_{Rsi} (herramienta DITEC)	NO SE PRESENTA riesgo de condensación SUPERFICIAL			
11	Condensación intersticial	Método Glaser (herramienta DITEC)	SI	SI	SI	SI
12	Conclusión planilla DITEC	Método Glaser (herramienta DITEC)	NO SE DISMINUYE el riesgo de condensación INTERSTICIAL	NO SE DISMINUYE el riesgo de condensación INTERSTICIAL	NO SE DISMINUYE el riesgo de condensación INTERSTICIAL	NO SE DISMINUYE el riesgo de condensación INTERSTICIAL
13	Formación de moho	-	?	?	?	?
14	Periodo total evaluado	-	3 años	3 años	3 años	3 años
15	Crecimiento de moho (Isopletes)	WUFI Pro	si	si	si	si
16	Curva límite (Isopletes)	WUFI Pro	LIM B II	LIM B II	LIM B I	LIM B II
17	Periodo correspondiente *3	WUFI Pro	3 años (26.280 horas)			
18	Radio de crecimiento (mm/año)	WUFI Bio	119,00	3,60	0,00	3,46
19	Índice de crecimiento de moho (-/año)	WUFI VTT	0,399	0,011	0,000	0,017
20	Periodo correspondiente	WUFI Bio / VTT	1 año (8.760 horas)			
21	Formación de moho	-	SI	NO	NO	NO

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la matriz se puede observar las diferencias en el periodo total evaluado , el parámetro medido y los resultados obtenidos. La principal gran diferencia que ya se conocía es que el cálculo estático solo evalúa el riesgo de condensación superficial e intersticial lo cual no basta para determinar la formación de moho. El cálculo o simulación dinámica por su parte si puede responder a la pregunta de formación o no de moho determinando además tres opciones y niveles de medición: a través de las curvas de isopletas, radio o tasa de crecimiento de moho e índice de crecimiento de moho.

La evaluación experimental, a pesar del registro de temperaturas bajo el punto de rocío y del registro de condensaciones (bajo la escala requerida), no resulta en formación de moho.

Todos los resultados del cálculo dinámico sobre el esmalte al agua común (EAC) indican que se producirá formación de moho al menos durante el primer año . Para este revestimiento el cálculo estático no mide la formación de moho, pero resulta una ausencia de riesgo de condensación superficial y un riesgo de condensación intersticial. Por su parte el experimento realizado sobre este revestimiento no registra condensaciones, temperaturas superficiales por debajo de la temperatura de punto de rocío ni moho visible.

Se podría entonces concluir que no se ha registrado aún formación de moho en el experimento debido al corto periodo evaluado, pero probablemente durante el primer año si se podría formar moho sobre la superficie interior, apoyado probablemente por las condensaciones calculadas en el interior del muro.

Si bien el resto de los revestimientos no registran un nivel de formación de moho como el EAC, el segundo mayor valor de radio de crecimiento de moho resulta es el del PMV con 3,6mm/año. Este resultado sería consecuente con el registro del periodo de temperaturas superficiales interiores menores a la temperatura de punto de rocío, si este resultado se apoya con las condensaciones intersticiales durante el año, se podría concluir que existe también un riesgo de formación de moho sobre este revestimiento.

El revestimiento EAA resulta en el cálculo dinámico sin formación de moho con tasa e índice de crecimiento de moho 0 e isopleta leve sobre LIM B I. El cálculo estático por su parte no registra condensaciones superficiales sobre este revestimiento y en el experimento no se registran temperaturas superficiales interiores bajo la temperatura de punto de rocío. Se podría entonces concluir que este es el revestimiento con mejor desempeño.

6.6. MODELACIÓN ESTADÍSTICA

Se desarrolla una modelación estadística que permita predecir la formación de moho en base a una característica del revestimiento de terminación, de la última capa que limita con el aire interior del corte constructivo estudiado en los capítulos anteriores. La idea es encontrar la relación que existe entre la característica del material de la última capa respecto al paso de vapor de agua y los parámetros de predicción de formación de moho.

Para poder generar esta modelación se recurre al software libre de análisis estadístico R Project for Statistical Computing, específicamente se utiliza la versión 2.12.2. Este software a partir de una base de datos compuesta por variables predictoras y variables respuesta permite generar, a través de funciones, operaciones estadísticas que entre otras cosas permiten la generación de un modelo de predicción.

Base de datos disponible:

La base de datos utilizada se basa en las variables predictoras espesor (E) y espesor de aire equivalente (Sd) sobre las variables respuestas obtenidas con los software WUFI Bio y WUFI VTT. Para el análisis de datos se consideran los resultados de las simulaciones dinámicas realizadas sobre el corte constructivo tipo y sus cuatro opciones de revestimiento interior de terminación:

Tabla N° 31: Base de datos disponible y tipos de variables

Ítem	Significado	Nombre	Un.	Tipo de variable	Material de la última capa			
					Esmalte al agua común	Papel mural vinilizado	Esmalte al agua "antimoho"	Papel mural común
1	Espesor última capa	E	mm	Predictora	0,020	0,500	0,020	0,250
2	Sd última capa	Sd	m	Predictora	2,540	2,450	0,100	1,225
3	Contenido de agua total	Wt	kg/m ²	Respuesta	1,620	1,720	1,740	1,740
4	Contenido de agua yeso cartón	Wyc	kg/m ²	Respuesta	5,510	5,600	5,650	5,620
5	Radio de crecimiento (Bio)	RC	mm/año	Respuesta	119,000	3,600	0,000	3,460
6	Índice de crecimiento de moho (VTT)	IC	-/año	Respuesta	0,399	0,011	0,000	0,017

Análisis de base datos:

Se realiza la lectura de los datos de las variables antes descritas y se grafica esta relación existente entre cada variable respuesta con las variables predictoras, para conocer a primera vista como se comportan. Para lograr este objetivo se utilizaron los paquetes de funciones "vegan", "permute" y "lattice"; y las siguientes funciones: "read.table", para la lectura de datos desde un archivo externo, "par" y "plot" para la creación de gráficos de dispersión, entre otras.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

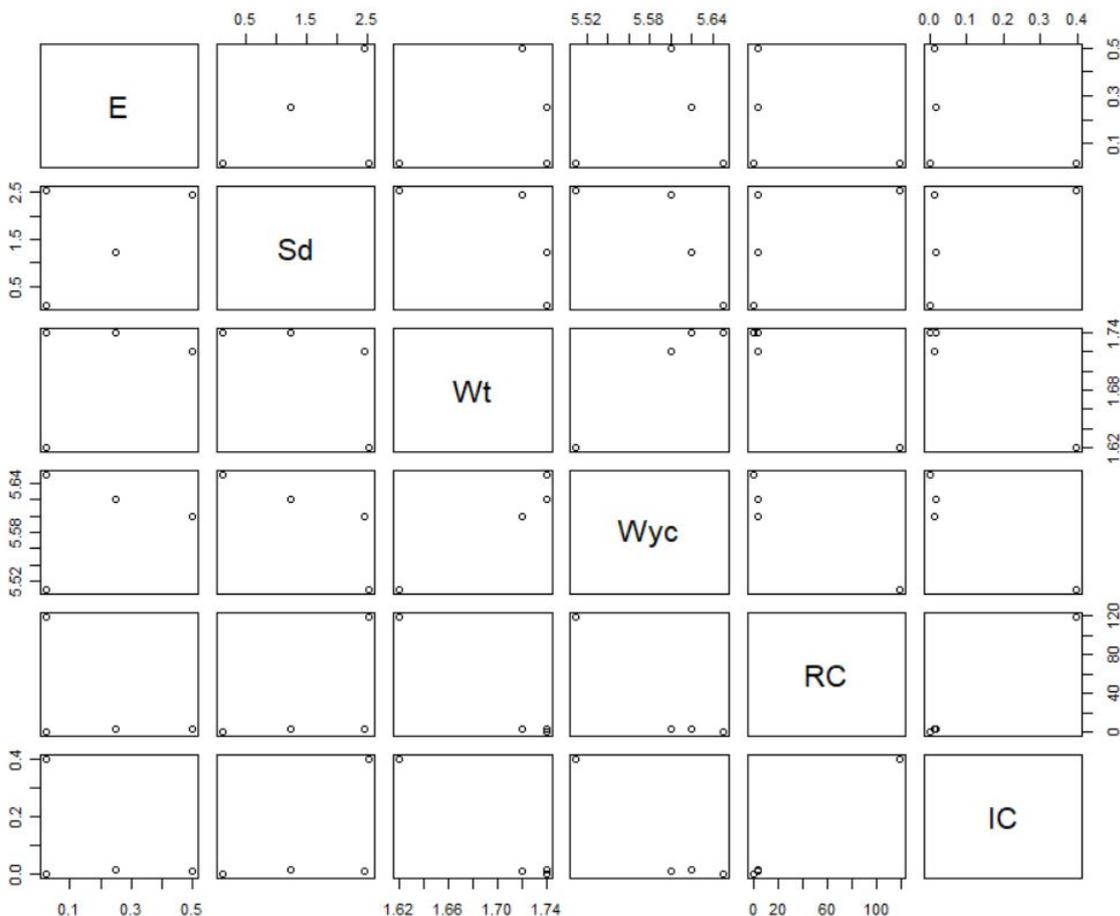


Figura N° 109: Gráfico de dispersión de correlación de variables

Estadística descriptiva:

Para la obtención de la estadística descriptiva de cada variable (respuestas y predictoras) se utilizó la función “summary”, la cual entrega algunos de los estadísticos descriptivos más importantes, pero no incluye la desviación estándar, es por ello que esta se calculó a través de la función “sd”.

Tabla N° 32: estadística descriptiva

Variable	Variables predictoras			Variables respuestas		
	E	Sd	Wt	Wyc	RC	IC
Min.	0,02000	0,10000	1,62000	5,51000	0,00000	0,00000
1st Qu.	0,02000	0,94370	1,69500	5,57700	2,59500	0,00825
Median	0,13500	1,83750	1,73000	5,61000	3,53000	0,01400
Mean	0,19750	1,57880	1,70500	5,59500	31,51500	0,10675
3rd Qu.	0,31250	2,47250	1,74000	5,62800	32,45000	0,11250
Max.	0,50000	2,54000	1,74000	5,65000	119,00000	0,39900
Desv.Est.	0,22897	1,15397	0,05745	0,06028	58,34710	0,19496

Análisis de correlación:

Se analizó la correlación existente entre las variables respuesta y las variables predictoras y entre las variables predictoras, a través de la función “cor”, realizando anteriormente un “subset” con la función “c” (concatenar),

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

todo dentro del análisis de Pearson. A través del análisis de este proceso se pudo determinar las variables correlacionadas y en base a eso seleccionar variables predictoras candidatas para modelación.

Tabla N° 33: Correlación entre las variables

	E	Sd	Wt	Wyc	RC	IC
E	1,0	0,4	0,4	0,2	-0,5	-0,5
Sd	0,4	1,0	-0,7	-0,8	0,6	0,6
Wt	0,4	-0,7	1,0	1,0	-1,0	-1,0
Wyc	0,2	-0,8	1,0	1,0	-0,9	-0,9
RC	-0,5	0,6	-1,0	-0,9	1,0	1,0
IC	-0,5	0,6	-1,0	-0,9	1,0	1,0

El valor máximo es 1,0 del cual se debe descartar el grupo de valores diagonales ya que es entre sí misma. El resultado numérico de la correlación entre variables permite descartar la variable E entendiendo que en todos los casos el factor es menor a 0,6.

Por su parte la variable predictora Sd resulta correlacionada con un valor de factor igual o mayor a 0,6. De esta manera esa variable se utilizará para modelar las variables respuestas.

La correlación alta entre las variables respuesta RC e IC permitirá modelar una ecuación predictora entre las dos variables, cabe destacar que ambas describen, en diferentes escalas e índices, la formación de moho y además provienen de dos fuentes distintas (WUFI Bio y WUFI VTT).

Modelación estadística:

Se ajustó un modelo de regresión lineal para predecir el contenido de agua y la formación de moho en base a la variable predictora Sd, para lograrlo se ajustó el modelo a través de la función “lm”.

Luego de ajustar el modelo, se ejecuta la función “m” para modelar cada variable, del resumen de esta función se obtienen los indicadores estadísticos para cada modelo:

Tabla N° 34: modelación estadística

Modelo	Indicadores estadísticos		Error	Grados de libertad	p*	Varianza explicada
lm(Wt~Sd)	Variable	p	0,05238	2	-0,03324	0,4457
	Sd	0,332356				
lm(Wyc~Sd)	Variable	p	0,04402	2	-0,04193	0,6445
	Sd	0,197				
lm(RC~Sd)	Variable	p	58,43	2	29,11	0,3315
	Sd	0,424				
lm(IC~Sd)	Variable	p	0,1956	2	0,0969	0,329
	Sd	0,426				

Como se puede observar la variable resultante con mayor significancia (p) con la variable predictiva es Wyc que a su vez posee el menor error y la mayor varianza explicada. Esta variable por lo tanto es la seleccionada para desarrollar el modelo predictivo.

Entre las dos variables resultantes IC y RC que describen la formación de moho se selecciona la variable RC para desarrollar el modelo predictivo. Como se puede observar, sus indicadores estadísticos no son los más representativos y se requiere de mayor cantidad de datos para poder ajustar el modelo.

Para cada una de las variables el modelo estadístico se basa en la siguiente ecuación:

$$Y(Sd) = \beta_0 + (\beta_1) * Sd \pm e$$

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Donde:

Y: variable resultante

Sd: variable predictora correspondiente al valor equivalente de espesor de aire (m)

β_0 : intercepto

β_1 : multiplicador de variable (p^*)

e: error residual estándar

De esta manera se determina la ecuación predictora según como sigue:

Predicción de contenido de agua capa de yeso cartón (Wyc) en base a valor de espesor equivalente de aire (Sd):

$$Wyc(Sd) = 5,6612 + (-0,04193)*Sd \pm 0,04402$$

Posteriormente se obtiene el gráfico con la función “plot” para ambas variables, luego se ejecuta la función “abline” que genera la recta del modelo predictivo.

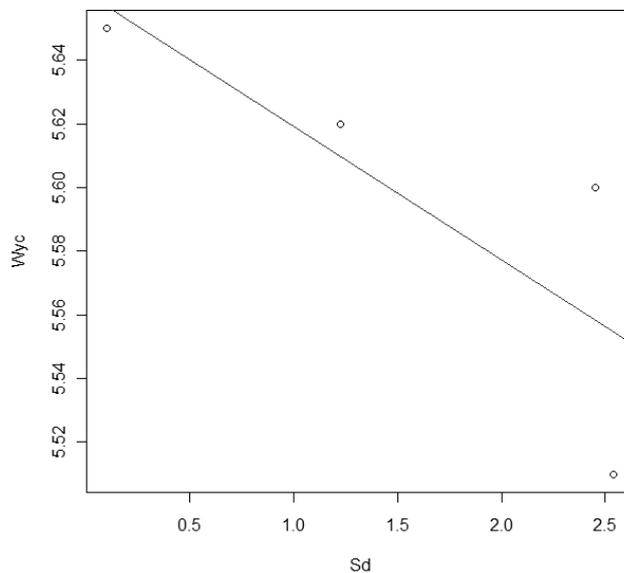


Figura N° 110: Gráfico de regresión modelo predictivo de Wyc en base a Sd

Como se puede observar en el gráfico resultante, mientras mayor es el espesor equivalente de aire de la última capa del muro estudiado (Sd), menor es el contenido de agua de la capa subyacente de yeso cartón al interior del muro (Wyc).

Predicción del radio o tasa de crecimiento de moho (RC) en base al valor de espesor equivalente de aire (Sd):

$$RC(Sd) = -14,45 + (29,11)*Sd \pm 58,43$$

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

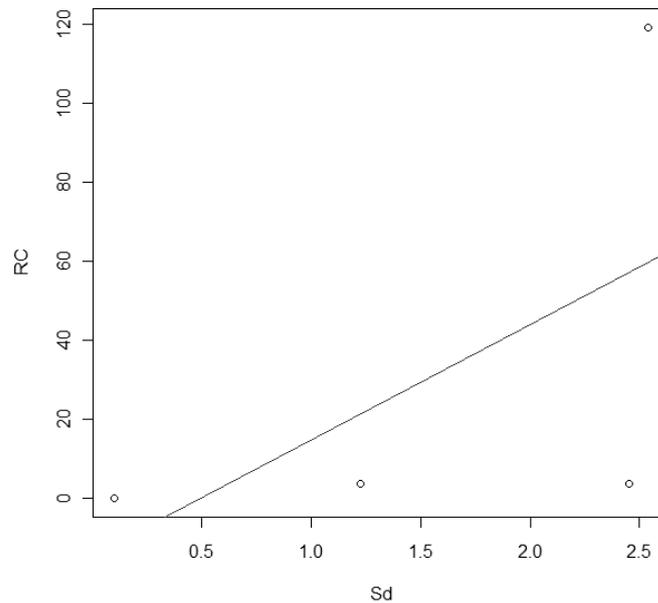


Figura N° 111: Gráfico de regresión modelo predictivo de RC en base a Sd

Como se puede observar en el gráfico resultante, mientras mayor es el espesor equivalente de aire de la última capa del muro estudiado (Sd), mayor es la tasa de crecimiento de moho sobre la superficie interior del muro (RC).

Se puede encontrar la correlación y predicción del radio o tasa de crecimiento de moho (RC) en base al índice de crecimiento de moho (IC), de esta manera se podría obtener un valor aproximado del resultado entregado por el software WUFI Bio (RC) solo en base a la utilización del software WUFI VTT (IC). Cabe destacar que este modelo se basa en los datos disponibles de esta investigación, los cuales para estas variables no cuentan con indicadores estadísticos suficientes, estos se pueden complementar y mejorar con una mayor base de datos.

$$RC (IC) = -0,4294 + (299,2448) * IC \pm 1,04$$

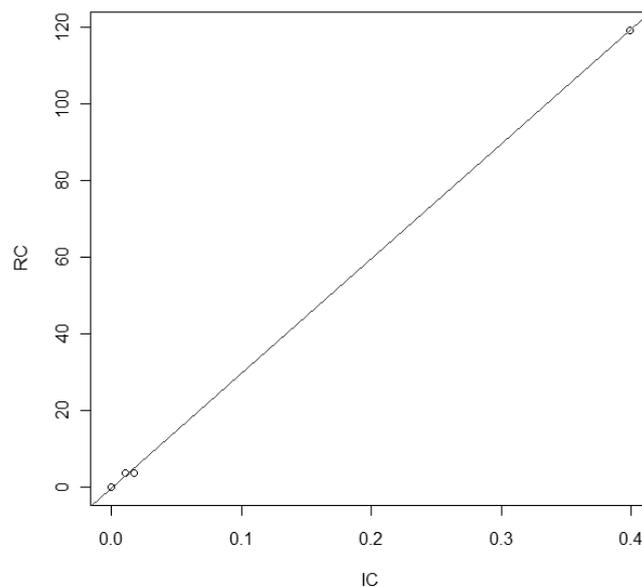


Figura N° 112: Gráfico de regresión modelo predictivo de RC en base a IC

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Ambas variables resultantes son directamente proporcionales lo cual se condice con lo indicado por Künzel (Bludau, Zirkelbach, and Künzel 2013) en su estudio comparativo de resultados de índice de formación de moho y tasa de crecimiento de moho de los softwares WUFI Bio y WUFI VTT.

Se propone ampliar la base de datos de este modelo para abarcar más tipo de soluciones constructivas, estandarizando según sea la ubicación del aislante térmico (variable A) y el tipo u origen del revestimiento interior (según valor de Sd) y su capa subyacente (variable B).

$$Im(RC \sim Sd + A + B)$$

De esta manera se podría adaptar el uso de esta ecuación predictiva en la herramienta de cálculo estático para a partir de las características del corte constructivo y material de revestimiento se pueda determinar el valor de la tasa de crecimiento de moho (RC).

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

7.1. CONCLUSIONES GENERALES

En base a los antecedentes estudiados, cálculos y experimentos realizados se puede concluir que se acepta la hipótesis de que una vivienda construida con estándares PDA presenta formación de moho, los requerimientos de disminución de condensaciones no garantizan la no formación de moho.

En los elementos de una edificación residencial se pueden encontrar diferentes especies de moho, entre 45 y 200 especies típicas. Si bien se puede presentar sola una especie, en la mayoría de los casos son más de una especie las cuales generan un efecto de competición entre ellas pudiendo agravar los daños.

Algunas células de moho además de crecer sobre el sustrato crecen activamente sobre el material particulado presente en el aire interior.

La formación de moho puede ocurrir si, en al menos cinco días consecutivos, la humedad relativa en la superficie del componente tiene un valor mayor que 80% en al menos 12 horas al día. Con mayor humedad, estos periodos pueden ser más cortos (Spitzner y de Anda, 2011). Por lo anterior es que se requiere asociar a la humedad relativa del ambiente interior el tiempo o periodo en el que se produce.

Los materiales susceptibles no deberían utilizarse cuando se produzcan altos niveles de generación de humedad, como en baños y cocinas. Los materiales de origen biológico son más propensos a la formación de moho. Respecto al ph del material, para evitar la formación de moho se debe preferir un material con ph base o alcalino.

Existe una discrepancia entre el clima interior y el microclima, las condiciones de la superficie pueden diferir mucho de las condiciones ambientales, Adan et al. (2011) definen 4 efectos: diferencias de temperaturas, transporte de vapor de agua en el aire, retención de humedad en la superficie y capacidad fúngica de influir en el entorno local, correspondiendo este último efecto a cuando el propio organismo vivo puede influir en el equilibrio hídrico en la interfaz sustrato-aire, ya sea de forma pasiva o activa. De esta manera los hongos se pueden aprovechar del estrés de la sequía, tanto a través de mecanismos intracelulares como extracelulares.

El factor más significativo en la formación de moho es el agua, esto se demostró en el análisis de sensibilidad realizado donde el aumento de la clase de humedad provocó el mayor aumento en la tasa de crecimiento de moho. Las superficies pueden mantenerse libres de moho si la humedad relativa en una habitación no excede el 70% durante más de 2 horas en un período de 12 horas, y no excede el 90% durante más de 1 hora en un período de 12 horas durante la temporada de calefacción (Altamirano, 2016).

El contenido de agua de un material es una función de la humedad relativa bajo condiciones de equilibrio, en los cálculos dinámicos se pudo demostrar que para cada revestimiento de terminación se presentan diferentes respuestas a las fluctuaciones de humedad del ambiente, siendo estas más o menos acentuadas.

Solo considerar el contenido de agua como parámetro apropiado para describir la susceptibilidad del material al moho es un error (Adan and Samson 2011).

Generalmente, el secado y la humectación ocurren a diferentes velocidades. La absorción de agua líquida por un material como el yeso poroso suele ser muy rápida, mientras que el secado puede durar mucho tiempo (Adan 1995). Pueden encontrarse diferencias opuestas, por ejemplo, en algunos sistemas de revestimiento, donde la absorción puede ser mucho más lenta que el secado (Baukh et al. 2010).

El secado rápido del material permite disminuir la viabilidad de las esporas fúngicas adaptadas a la alta humedad (Pasanen et al. 2000). Sin embargo, algunos mohos, como las especies de *Penicillium*, son tolerantes al estrés ambiental.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

El concepto de Time of Wetness (TOW) hace referencia a la inercia en la conservación del agua de un sustrato que puede desempeñar un papel crucial en la definición de las condiciones de humedad de la superficie. En ese caso, los efectos de inercia se vuelven importantes.

Si bien se pueden producir condensaciones superficiales e intersticiales, las investigaciones demuestran que la formación de moho se produce sobre la superficie y luego son los micelios los que pueden alcanzar mayor profundidad en la primera capa del material del corte constructivo analizado.

En los materiales porosos, a mayor contenido de humedad de los materiales, más temprana es la colonización e incluso mayores son las tasas de extensión de los hifas (Van Laarhoven et al. 2015)

Puede afirmarse que la difusión térmica no tiene ninguna importancia para las aplicaciones científicas de la construcción, por lo que la presión de vapor es el único potencial de transporte significativo para la difusión de vapor de agua en materiales porosos (Janssen 2010).

El proceso de adhesión de la espora es necesario para la formación de moho. Dicho de otra manera, si se puede evitar la adhesión de la espora en el sustrato, no bastará con la humedad relativa y sustrato ideal para que se produzca la formación de moho.

Algunas células del moho pueden crecer en el material particulado o contaminantes existentes en el aire (Weikl et al. 2016). Si bien los hongos interiores producen poco micelio aéreo, se puede llegar hasta producir germinación y crecimiento de micelio sobre partículas aéreas.

Las enfermedades asociadas al moho pueden ser leves desde un dolor de cabeza a graves como una infección invasiva con neumonía. Por ejemplo, el *Aspergillus* puede afectar el corazón, los pulmones, el cerebro y los riñones.

Además de lo anterior, cuando las personas están alrededor del moho tóxico normalmente están expuestas a las micotoxinas del aire por inhalación. Estas micotoxinas terminan en los pulmones y pueden causar problemas respiratorios y otros síntomas graves.

La calidad microbiológica del aire varía según el sistema de ventilación con el que se cuenta. El funcionamiento eficaz y el mantenimiento regular de los sistemas de ventilación mecánica o de aire acondicionado garantizan una mejor calidad higiénica en los edificios de oficinas que la ventilación natural/gravitatoria (Szymczak et al. 2018). Sea cual sea el sistema adoptado de ventilación, si no se le realiza limpieza y mantenciones periódicas, aunque cuente con filtros de aire, será ineficiente.

La investigación de Becker et al (1986) y Becker y Puterman (1987) determinaron que el crecimiento de mohos aumentó significativamente sobre las pinturas de polivinilo. Esto se condice con el experimento realizado donde se registra que la pintura en base a agua (EAC) le permite al muro respirar y es la que alberga menos agua.

El crecimiento de moho en papel mural se determina principalmente por la cantidad de material orgánico que este tiene, la mayoría son de papel de celulosa por lo que pueden proveer la cantidad de proteínas necesarias para el crecimiento del moho. Además muchos papeles murales tienen una terminación rugosa o con relieve, lo cual facilita la incrustación y adhesión de polvo y otras partículas que pueden transportar esporas de moho.

Ho et. al. (2015) determinaron fue que existe una clara correlación entre el radio de crecimiento de moho y las propiedades higroscópicas del papel mural. En los cálculos dinámicos realizados esto se demostró ya que para los revestimientos PMV con Sd de 2,45m y PMC con Sd de 1,225, el valor de contenido de agua total y de la capa subyacente resultaron prácticamente idénticos y la tasa o radio de crecimiento de moho resultaron ser casi iguales (3,6 y 3,46 respectivamente).

Las placas de yeso a menudo contienen aditivos orgánicos que causan susceptibilidad al crecimiento de moho, además de ser un material poroso, esta recubierto por todas sus caras con papel. Becker y Puterman (1987) encontraron crecimiento de moho en placas de yeso cartón liso dentro de los 5 días después de la inoculación.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Además de la formación de moho y otros microorganismos, la humedad relativa alta y contenido excesivo de agua en los materiales pueden producir los siguientes daños y cambios en los mismos: eflorescencias, oxidación, corrosión en metales, aumento conductividad térmica, variación del factor de resistencia al vapor de agua y desprendimientos. La valoración de las propiedades “dinámicas” de los materiales es necesaria para una correcta predicción de formación de moho.

El cálculo dinámico de predicción de formación de moho es una herramienta útil que permite considerar en los datos de entrada características de los materiales y del ambiente que el cálculo estático no permite. La principal diferencia entre el cálculo estático y dinámico se basa en el tiempo de evaluación, mientras el cálculo estático se realiza en un periodo, el cálculo dinámico se puede realizar en años si se requiere, además de tener un detalle en tiempo real, pudiendo además regular el paso del tiempo. Además, este enfoque de evaluación denominado de estados transitorios, permite que los parámetros de entrada cambien con el tiempo, logrando por lo tanto un cálculo teórico mucho más cercano a la realidad.

Los métodos de predicción de crecimiento de moho se basan en ensayos realizados in vitro en laboratorio y complementan los cálculos dinámicos permitiendo predecir la formación de moho.

La normativa chilena no considera la evaluación de la formación de moho ni el diseño libre de moho. La NCh 1973 es la normativa que determina el procedimiento para la evaluación del riesgo de condensaciones superficiales e intersticiales que, si bien cubre un aspecto de la formación de moho, no es suficiente para determinar la formación de moho.

El estándar PDA existente en muchas ciudades de Chile abarca 5 aspectos de eficiencia energética que buscan la disminución de la contaminación atmosférica a través de la disminución del consumo energético de las viviendas. Además, a través de la evaluación del riesgo de condensaciones, envolvente térmica más robusta que la normativa térmica actual, hermeticidad y sistema de ventilación, contribuyen a la disminución de la formación de moho. De todas maneras, el estándar PDA se puede mejorar para que además permita disminuir la formación de moho.

La normativa alemana se enfoca en el riesgo de condensación en base al valor del factor de resistencia superficial interior diferenciando entre la parte normal del elemento y el puente térmico. En general es similar a la NCh1973, pero agrega aspectos como indicaciones sobre hermeticidad de aire, protección contra lluvias y tipos de elementos sobre los que aplica.

Existe dentro de las normativas DIN una parte especial para la prevención del crecimiento de moho en edificios residenciales donde involucra la resistencia térmica y temperaturas superficiales interiores mínimas del elemento, en su parte normal y el puente térmico. Regulando también la función del usuario de la vivienda en la operación de la calefacción, ventilación y posición de muebles, la norma entrega un instructivo e indicaciones acerca de estos aspectos mencionados.

El cálculo estático para los 4 tipos de revestimientos evaluados resulta sin riesgo de condensación superficial y con 12 interfases de condensación intersticial.

El esmalte al agua común (EAC) y el papel mural vinilizado (PMV) poseen los valores de S_d más altos de los revestimientos evaluados, resultando ser los casos más favorables en relación a la humedad relativa interior crítica de condensación. Esta relación se mantiene para todos los revestimientos evaluados pudiendo concluirse que mientras más alto sea el valor de S_d de la última capa, mayor y más favorable será el valor de humedad relativa interior crítica.

Sobre este cálculo estático también se puede concluir que el valor de S_d no influye en ningún caso en el resultado de riesgo de condensaciones superficiales e intersticiales, manteniéndose incluso estas últimas en la misma cantidad de interfases de condensación.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Al término del periodo de evaluación del cálculo dinámico, la solución constructiva con esmalte al agua común (EAC) es la que contiene menos agua, siendo a su vez la solución constructiva con esmalte al agua antimoho (EAA) la que contiene más agua, tanto en la solución constructiva total como en la capa subyacente (yeso cartón).

Las fluctuaciones en el contenido de agua del EAC son las menos variables y las del EAA, seguidas del PMV son las más acentuadas. Lo anterior permite concluir que el EAC permite un secado más rápido o bien frena el vapor de agua de tal manera que sus fluctuaciones de contenido de agua son menos acentuadas.

Las fluctuaciones en el contenido de humedad de la capa subyacente (yeso cartón) se diferencian notoriamente entre los 4 revestimientos con lo cual se puede concluir que el contenido de agua de la capa subyacente y su fluctuación en el tiempo dependen directamente del tipo de revestimiento de terminación elegido.

A pesar de las fluctuaciones más acentuadas, el revestimiento EAA es el que presenta un mejor desempeño frente a la formación de moho y por el contrario el revestimiento EAC es el de peor desempeño. Esto es consecuente entre los resultados de curva de isoplejas, tasa e índice de crecimiento de moho.

Si comparamos solo los revestimientos de papel mural vinilizado (PMV) y papel mural común (PMC) no se encuentran diferencias en los resultados de los cálculos dinámicos, a pesar de la diferencia en el valor de S_d y en las características cargadas de cada material, los valores de las curvas isoplejas, tas e índice de crecimiento de moho son prácticamente iguales.

El análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada del cálculo dinámico permite concluir que la variable ambiental de humedad relativa interior es la más influyente en el resultado de formación de moho. Dicho de otro modo, solo aumentando la humedad relativa interior del rango aproximado de 70-78% a 80-86% provoca un aumento en la tasa de crecimiento de moho a más del doble pasando de un semáforo amarillo a uno rojo.

Después del caso con las variaciones simultáneas en las características del material de la primera capa interior, la modificación en la clase de sensibilidad es la que registra el mayor aumento en la posibilidad de formación de moho.

La comparación de los casos de revestimientos y variaciones evaluadas permite concluir que la principal causa de formación de moho se basa en los valores elevados de humedad relativa interior, luego el siguiente caso sería el tipo de revestimiento existente, su origen y sensibilidad. Los cálculos realizados entonces demuestran la importancia de dos pilares fundamentales para una envolvente libre de moho: el ambiente interior y el sustrato.

El experimento de laboratorio concluyó que se produce condensación superficial solo en el revestimiento PMV pero para corroborarlo se deberían realizar más estudios que permitan comprobar los valores obtenidos ya que se observa en los gráficos que corresponde a un registro puntual y que no tiene lógica física entendiéndose que todos los revestimientos (en la sección del aislante) tienen la misma resistencia térmica con lo que las temperaturas superficiales interiores deberían ser similares.

La mayor diferencia en los registros de las hojas de condensaciones se produce un día puntual sobre el EAA, este diferencial de todas maneras no es significativo y no se puede concluir que se produce condensación o formación de moho.

Debido a las fluctuaciones registradas con las hojas de condensación se puede concluir que el EAC presenta un registro de condensaciones con ciclos o fluctuaciones más cortas, contrario al PMV que presenta fluctuaciones más acentuadas. Los revestimientos reaccionan a las variaciones de humedad relativa interior diferenciándose entre sí. Quizá se puede deber a que el EAC frena menos el vapor de agua y no lo mantiene en la superficie a diferencia del PMV que al frenar más el vapor de agua mantiene una humedad mayor sobre la superficie que

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

otros revestimientos, sin contar su mayor rugosidad. Este registro experimental coincide con el resultado del cálculo dinámico.

Se puede concluir que se producirá formación de moho sobre el revestimiento EAC, al menos durante el primer año. Para este revestimiento el cálculo estático determina un riesgo de condensación intersticial que podría provocar la formación posterior de moho superficial. Por su parte el experimento realizado sobre este revestimiento no registra condensaciones ni formación de moho, probablemente se deba al corto periodo de evaluación realizado.

Si bien el resto de los revestimientos no registran un nivel de formación de moho como el EAC, el segundo mayor valor de radio de crecimiento de moho resulta es el del PMV. Este resultado sería consecuente con el registro del periodo de temperaturas superficiales interiores menores a la temperatura de punto de rocío, si este resultado se apoya con las condensaciones intersticiales durante el año, se podría concluir que existe también un riesgo de formación de moho sobre este revestimiento.

En base a los resultados obtenidos y su análisis se puede concluir que el revestimiento EAA es el revestimiento con mejor desempeño en relación a la no formación de moho.

El gráfico de regresión del modelo predictivo de RC en base a IC demuestra lo ya estudiado por Ambas variables resultantes son directamente proporcionales lo cual se condice con lo indicado por Künzel (Bludau, Zirkelbach, and Künzel 2013) sobre la correlación directa entre el índice de crecimiento y el radio o tasa de crecimiento de moho entregado por WUFI Bio y WUFI VTT respectivamente.

Si bien ya se cuenta con desempeño en lo que respecta a la formación de moho a partir de las variables predictoras utilizadas en esta investigación, se debe desarrollar el estudio de sensibilidad más amplio y sobre variaciones de composición de cortes constructivos para poder validar el modelo predictivo.

Se necesita más investigación sobre la vulnerabilidad y los efectos de los nuevos materiales de construcción.

Como se establece en la bibliografía revisada, picos muy cortos de humedad, incluso por debajo de la saturación de humedad relativa, pueden dar lugar al crecimiento de moho.

Si bien dentro de esta investigación se propone una mejora de la herramienta de cálculo estático de condensaciones para que sirva como cálculo estático de formación de moho, cabe señalar que la predicción del crecimiento no puede hacerse sobre la base de datos de estado estacionario, y el control de los riesgos de crecimiento de moho sobre la base de la humedad relativa ambiental por sí sola no es una garantía en absoluto para un ambiente libre de moho. El uso de valores promedio de la humedad relativa del aire es impreciso al intentar predecir el crecimiento de moho .

En caso de condiciones de humedad interior muy transitorias, las propiedades de la capa de terminación, en especialmente la de albergar humedad, juegan un papel fundamental con respecto al crecimiento de moho en la superficie.

Se puede observar que un valor de Sd más alto no garantiza una baja formación de moho, según los gráficos resulta que entre más alto el valor de Sd, más alto es el valor de IC y RC.

Un resultado similar se observa en la relación de Sd y humedad contenida de los materiales total al final del periodo de 3 años analizado, y del Sd con el correspondiente de la capa de yeso cartón donde entre más alto es el valor de Sd, más alto es el contenido de humedad de materiales. Sin duda que esta conclusión se debe analizar bajo las condiciones de borde consideradas, como por ejemplo las fuentes de humedad, orientación del muro analizado, etc.

El desarrollo de una modelación estadística de parámetros que representan las características del material de revestimiento, del material de la capa subyacente y de la posición del aislante, es muy útil si se requiere determinar el índice de formación de moho sobre una herramienta de cálculo estática.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES**7.2. PROPUESTA DE CRITERIOS DE DISEÑO DE ENVOLVENTE HIGROTÉRMICA LIBRE DE MOHO**

Se acepta la hipótesis planteada de que a partir del análisis de los resultados de experimento en laboratorio, cálculos estáticos, simulaciones dinámicas y modelos de predicción además de la consideración del estado del arte, es posible establecer criterios de diseño de envolvente higrotérmica de viviendas orientada a evitar la formación de moho.

Las siguientes propuestas se basan en la bibliografía revisada, cálculos teóricos estáticos y dinámicos, experimento de laboratorio y análisis de resultados desarrollados y se aplican sobre las herramientas existentes en Chile relacionadas con la formación de moho.

7.2.1. PROPUESTA DE MODIFICACIÓN HERRAMIENTA DE CÁLCULO ESTÁTICO**Sobre las condiciones ambientales consideradas:**

Como se revisó en la bibliografía existente, la humedad crítica considerada en la herramienta de 100% no es adecuada y no garantiza la no ocurrencia de condensaciones, ni menos la formación de moho. Una mejora inicial sería considerar una humedad relativa crítica de 80%.

Si bien esta herramienta está diseñada para predecir el riesgo de condensaciones, se le podría asociar el factor tiempo el cual es importante para la formación de moho, recordemos que la bibliografía (Spitzner y de Anda, 2011) indica que para la formación de moho no se requiere necesariamente la presencia de agua líquida, como el agua de condensación, más bien se requiere la combinación de ciertas condiciones durante un tiempo determinado. Es decir, no basta con indicar las condiciones ambientales sino el tiempo o periodo que esas condiciones se mantienen.

Se demostró que la humedad relativa del ambiente interior es muy gravitante en la formación de moho. Se puede mejorar la herramienta si se considera en la evaluación la humedad relativa interior mayor de las tres evaluaciones que hoy se ejecutan, pero restringiendo las temperaturas exteriores mínimas a las medias del mes y no a un instante específico que no se mantendrá por mucho tiempo.

La humedad relativa exterior se debería mantener ya que la consideración de la media mensual no sería adecuada entendiéndose que se demostró que el contenido de agua del material de la primera capa y de la capa subyacente interior están directamente relacionados con las fluctuaciones de la humedad relativa.

En el ejemplo desarrollado, para la ciudad de Concepción se debería considerar en la evaluación estática una temperatura mínima de 8,5°C (media del mes), humedad relativa exterior de 96% (actualmente considerada), temperatura interior de 19°C y humedad relativa interior de 80%.

Sobre las características del sustrato utilizado:

La herramienta considera solo el valor de Sd o sus equivalentes, además del valor de conductividad y espesor, para la determinación de las curvas de presión, sin embargo, como se revisó en la bibliografía existente y en los cálculos dinámicos realizados, la variación de las demás características de los materiales puede modificar el resultado de formación de moho. El gráfico que relaciona el valor de Sd y RC demostró que a mayor Sd mayor también RC, dicho de otra manera, un freno de vapor o barrera de vapor no garantiza la no formación de moho y por el contrario la incrementa. Por otra parte, en el análisis de sensibilidad, la variación de las condiciones del sustrato resultó importante.

Para mantener la herramienta estática se debería agregar una variable al tipo de material sin complejizar el cálculo, pero dándole un peso a la variable del sustrato. Se propone agregar dos celdas de selección donde se elija el tipo de sustrato de la primera capa en contacto con el aire interior:

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Clase de sustrato: de origen biológico, poroso o no biológico. Se pueden también asociar a la sensibilidad del sustrato (muy sensitivo, sensitivo y no sensitivo).

Estado de la superficie: limpia o sucia.

Estas variables no intervendrían en el gráfico de condensaciones, pero si en la evaluación final de formación o no de moho. En la base de datos de materiales existente en la herramienta de cálculo se pueden agrupar los materiales con según su clasificación de sensibilidad.

Condensaciones y formación de moho:

Si se mejora la herramienta de cálculo para que permita predecir la formación de moho, no se debería diferenciar entre condensación intersticial y condensación superficial ya que si se forma agua líquida al interior del muro, debido a las diferencia de presión, hermeticidad y porosidad, origen, capacidad de absorción y contención de agua de los materiales, es muy probable que se forme moho a lo largo del tiempo. Por ejemplo para el EAC no se presenta riesgo de condensación superficial pero si se producen condensaciones intersticiales en 12 interfaces con una humedad relativa interior crítica de 53%. Para este mismo caso el cálculo estático determina en todos sus resultados que se formará moho en su superficie.

Se propone que si, bajo las condiciones ambientales modificadas, la evaluación indica riesgo de condensación superficial o intersticial entonces existirá de todas maneras riesgo de formación de moho.

Además de la modificación anterior se propone dar un paso más y realizar la evaluación sobre el caso proyectado, sin que la conclusión de disminución de condensaciones se relacione con un caso base. Esto permitirá disminuir las posibilidades de formación de condensación y moho ya que actualmente se puede aprobar una solución con humedades relativas críticas bajas, múltiples interfaces de condensación si estas son mínimamente mejores al supuesto caso base con el que se compara.

Sobre la sección analizada:

Además de las modificaciones ya mencionadas se propone realizar una modificación importante respecto a la sección analizada. Actualmente se solicita analizar la sección tipo del elemento y la sección del puente térmico, se propone calcular el riesgo de condensaciones y formación de moho sobre la sección tipo del elemento ya que la actual evaluación sobre el puente térmico es imprecisa y se basa en una sección que considera un ancho no realista del material del puente térmico. Por ejemplo, en una tabiquería de madera se analiza la sección del aislante térmico y la sección de la estructura de madera, la sección del aislante térmico es realista ya que el flujo de calor y de presiones de vapor será normal pero en el puente térmico el flujo de calor y de presiones de vapor será singular y requiere de otra herramienta de cálculo, por ejemplo de simulación dinámica en dos dimensiones.

Herramienta de cálculo propuesta:

A continuación, se presenta una imagen referencial de la herramienta de cálculo con las propuestas de mejora, las modificaciones se destacan con color amarillo. Como se mencionó esta corresponde a la sección tipo del elemento estudiado en su caso a ejecutar, sin caso base de comparación.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

CONDICIONES AMBIENTALES		RESULTADOS																										
<p>Ubicación del proyecto: Provincia de Concepción</p> <p>Condiciones exteriores: 8,5°C; 96% de HR (temp. media mes de julio)</p> <p>Condiciones interiores: 80% de HR</p> <p>HR máx. aceptable, ψ_{sicc}: 0,8</p> <p>Dirección de flujo: Horizontal</p>																												
<p style="text-align: right;">Resistencia térmica, R m²K/W</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: left;">Materiales que componen la solución constructiva</th> <th style="text-align: right;">Resistencia térmica, R</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1 SmartPanel; $\mu = 316$; $e=0,0111$ m</td><td></td><td style="text-align: right;">0,202</td></tr> <tr><td>2 Cámara de aire no ventilada; $S_d = 0,01$ m; $e=0,01$ m</td><td></td><td style="text-align: right;">0,140</td></tr> <tr><td>3 Typar; $\mu = 1690$; $e=0,000175$ m</td><td></td><td style="text-align: right;">0,000</td></tr> <tr><td>4 OSB $\rho = 648$ kg/m³; $\mu = 371$; $e=0,0095$ m</td><td></td><td style="text-align: right;">0,073</td></tr> <tr><td>5 Lana de vidrio $\rho = 11$ kg/m³; $\mu = 5$; $e=0,08$ m</td><td></td><td style="text-align: right;">1,951</td></tr> <tr><td>6 Cámara de aire no ventilada; $S_d = 0,01$ m; $e=0,015$ m</td><td></td><td style="text-align: right;">0,155</td></tr> <tr><td>7 Yeso Cartón $\rho = 750$ kg/m³; $\mu = 20$; $e=0,015$ m</td><td></td><td style="text-align: right;">0,063</td></tr> <tr><td>8 Esmalte al agua (10 micras); $\mu = 127160$; $e=0,00002$ m</td><td></td><td style="text-align: right;">0,000</td></tr> </tbody> </table> <p>Espesor total de la solución: 141 [mm]</p> <p>Resistencia térmica total, R_T: 2,754 [m²K/W]</p>	Materiales que componen la solución constructiva		Resistencia térmica, R	1 SmartPanel; $\mu = 316$; $e=0,0111$ m		0,202	2 Cámara de aire no ventilada; $S_d = 0,01$ m; $e=0,01$ m		0,140	3 Typar; $\mu = 1690$; $e=0,000175$ m		0,000	4 OSB $\rho = 648$ kg/m ³ ; $\mu = 371$; $e=0,0095$ m		0,073	5 Lana de vidrio $\rho = 11$ kg/m ³ ; $\mu = 5$; $e=0,08$ m		1,951	6 Cámara de aire no ventilada; $S_d = 0,01$ m; $e=0,015$ m		0,155	7 Yeso Cartón $\rho = 750$ kg/m ³ ; $\mu = 20$; $e=0,015$ m		0,063	8 Esmalte al agua (10 micras); $\mu = 127160$; $e=0,00002$ m		0,000	
Materiales que componen la solución constructiva		Resistencia térmica, R																										
1 SmartPanel; $\mu = 316$; $e=0,0111$ m		0,202																										
2 Cámara de aire no ventilada; $S_d = 0,01$ m; $e=0,01$ m		0,140																										
3 Typar; $\mu = 1690$; $e=0,000175$ m		0,000																										
4 OSB $\rho = 648$ kg/m ³ ; $\mu = 371$; $e=0,0095$ m		0,073																										
5 Lana de vidrio $\rho = 11$ kg/m ³ ; $\mu = 5$; $e=0,08$ m		1,951																										
6 Cámara de aire no ventilada; $S_d = 0,01$ m; $e=0,015$ m		0,155																										
7 Yeso Cartón $\rho = 750$ kg/m ³ ; $\mu = 20$; $e=0,015$ m		0,063																										
8 Esmalte al agua (10 micras); $\mu = 127160$; $e=0,00002$ m		0,000																										
CARACTERÍSTICAS SUSTRATO																												
<p>Clase de sustrato</p> <p><input type="checkbox"/> Biológico</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Poroso</p> <p><input type="checkbox"/> No biológico</p>	<p>Estado de la superficie</p> <p><input type="checkbox"/> limpia</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> sucia</p>																											

RESULTADOS				
	Puntos de análisis			HR Cond.
HR interior, ψ_i:	65%	75%	80%	50%
Condensación superficial:	No	No	No	No
Res. Térmica caso base	2,754	2,754	2,754	2,754
Res. Térmica total mín, $R_{T,min}$	0,257	0,382	0,490	0,162
Condensación intersticial:	Sí	Sí	Sí	Sí
Detalle de interfaces con condensación:				
Superficie exterior				
Interfase 1	X	X	X	
Interfase 2	X	X	X	
Interfase 3	X	X	X	
Interfase 4	X	X	X	X
N° Interfaces condensación:	4	4	4	
Total:	12 Interfaces			
CONCLUSIÓN				
<p>Condensación superficial</p> <p style="text-align: center;"></p>	<p>Formación de moho</p> <p style="text-align: center;"></p>			
<p>Condensación intersticial</p> <p style="text-align: center;"></p>				
Fecha: _____		Firma profesional competente: _____		

Figura N° 113: Imagen referencial de la herramienta de cálculo con las propuestas de mejora.

Como siguiente paso se podría incluir en la conclusión final de la herramienta, las medidas recomendadas para mejorar el caso estudiado, las cuales se deben relacionar con los otros criterios para lograr una vivienda libre de moho, por ejemplo la inclusión o no de un sistema de ventilación.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES**7.2.2. PROPUESTA DE MODIFICACIÓN REQUERIMIENTOS PDA RELACIONADOS**

Sobre PDA u otros instrumentos, quizá una normativa complementaria al estudio de riesgo de condensaciones, similar a la DIN relacionada.

Asociar el manejo del ambiente interior.

Cuando se debe usar la herramienta de cálculo de condensaciones y formación de moho. Si se utiliza aislación térmica exterior que cumple transmitancia mínima entonces no será necesario esa evaluación.

Sobre la transmitancia térmica:

Se debería restringir la verificación del cumplimiento al cálculo según NCh 853 ya que el listado de soluciones y el uso de materiales R100 pueden permitir la presencia de puentes térmicos donde se produzcan temperaturas superficiales interiores críticas y formación de moho.

Sobre el cálculo de condensaciones:

Además de adoptar las modificaciones propuestas, se debería restringir el uso de la herramienta de cálculo:

Elemento con aislación térmica exterior continua: No es necesario el cálculo de condensaciones y formación de moho.

Elemento con aislación térmica interelementos: Se debe verificar el riesgo de condensaciones y moho con la herramienta de cálculo estática.

Elemento con aislación térmica interior y exterior: Se debe verificar el riesgo de condensaciones y moho con la herramienta de cálculo estática.

Elemento con aislación térmica interior: Se debe verificar el riesgo de condensaciones y moho con un cálculo dinámico (software de simulación dinámica) con un periodo de evaluación mínima de 3 años.

Sobre el sistema de ventilación:

Como se demostró en los cálculos realizados, el aumento de la humedad relativa interior afecta directamente a la formación de moho, específicamente se registró un aumento en la tasa de crecimiento de moho de un 238% por efecto del cambio de la clase higrotérmica de 4 a 5.

Por lo anterior es que se puede concluir que lo más importante es regular los niveles de humedad interior para lo cual la ventilación juega un papel muy importante.

Se propone mantener la inclusión de al menos dos extractores con sensor de humedad o higróstato en la cocina y al menos en un baño.

Como lo demostró la investigación de Weikl et al. (2016) las esporas de moho se pueden trasladar por las partículas de contaminantes de polvo u otras por el aire y luego adherirse a las superficies, incluso estas pueden germinar sobre esas partículas contaminantes. Debido a lo anterior es que se recomienda, especialmente en las zonas saturadas por material MP2,5 o MP10, utilizar filtros de polvo y de material particulado para disminuir la posibilidad de ingreso de contaminantes exteriores que además transporten esporas de mohos. Para garantizar la extracción de los contaminantes que se produzcan al interior de la vivienda (no relacionados al vapor de agua) se recomienda mantener una tasa de ventilación mínima continua. Por todo lo anterior es que, a las características ya definidas para los sistemas de ventilación, se debería agregar lo siguiente:

- Filtro de polvo y de material particulado.
- Funcionamiento continuo del sistema de ventilación a una tasa mínima.

Como punto adicional se debería agregar la obligación de que las viviendas nuevas o con mejoramiento de las zonas PDA deberían contar obligatoriamente con un higrómetro que permita verificar que se mantienen las condiciones ambientales adecuadas para el hogar, sin humedad relativa excesiva y sin temperaturas fuera del rango de confort.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES**Normativa complementaria que haga referencia a la formación de moho:**

Se propone desarrollar una normativa complementaria similar a la DIN 4108-8 a “Prevención del crecimiento de moho en edificios residenciales”. Sin duda que esta norma se debería trabajar con tiempo y adaptar al uso nacional con los climas de nuestro país.

Los requisitos que se pueden aplicar en Chile serían basados en los siguientes pilares:

1. **Cumplimiento de temperatura superficial mínima:** que evite condensaciones y formación de moho. Este cálculo se puede derivar de las resistencias térmicas actualmente exigibles.
2. **Desarrollo de cálculo de puentes térmicos:** Como se mencionó en el capítulo anterior, se recomienda inicialmente realizar la evaluación de condensaciones y formación de moho en la sección del aislante del elemento constructivo ya que el puente térmico presenta un flujo de calor y de presiones de vapor singular. En la normativa de formación de moho sería necesario considerarlos para lo cual se podría establecer la consideración de las temperaturas superficiales mínimas de la sección del aislante térmico y de la sección del puente térmico a través de:
 - Catálogo de puentes térmicos con las soluciones típicas utilizadas en Chile.
 - Herramienta de cálculo de puentes térmicos para la cual la norma deberá definir las condiciones de borde a considerar.
3. **Establecer recomendaciones para el usuario:**
 - A. Evacuación de la humedad
 - B. Ventilar adecuadamente (a través de ventanas y/o el sistema de ventilación ya recomendado)
 - C. Calefaccionar adecuadamente
 - D. Posicionar adecuadamente los muebles (no apegados a muros exteriores)
 - E. Consideración del periodo de secado de los materiales de la vivienda nueva

Cada una de estas recomendaciones deberían apoyarse en guías con instructivos de operación específicos que incluyan las condiciones de borde a considerar y la forma práctica de verificar su cumplimiento.

4. **Requerimientos base del sustrato utilizado como recubrimiento de terminación interior:** como se propuso para la evaluación de formación de moho con la herramienta de cálculo estático, la idea sería agrupar los materiales del listado existente actualmente, en materiales de origen biológico, porosos o no biológicos para poder efectuar recomendaciones de diseño de elementos constructivos y revestimientos con superficies libres de moho. Mayor detalle de este punto se entregará en el siguiente capítulo.

7.2.3. REQUERIMIENTOS DEL SUSTRATO O RECUBRIMIENTO DE TERMINACIÓN**Preferencia de materiales no biológicos:**

La clasificación de materiales ya propuesta es necesaria ya que los materiales susceptibles no deberían utilizarse cuando se produzcan altos niveles de generación de humedad, como en baños y cocinas. Se recomienda evitar el uso, por ejemplo, de yeso cartón en muros y cielos de estos recintos húmedos mencionados ya que el papel que posee en su cara interior podría facilitar la formación de moho. La pintura que se aplique sobre este yeso cartón podría aportar a su protección, pero, como se probó con los cálculos realizados, una pintura con valor de S_d alto no garantiza la no formación de moho. En las mismas pruebas además de demostró que este tipo de material puede albergar gran cantidad de agua durante el tiempo siendo afectado de manera directa con las fluctuaciones del contenido de agua del ambiente interior.

Se especificaron los niveles críticos de humedad evaluados para el crecimiento de moho sobre varios materiales típicos de construcción. Según esa investigación entonces se debe preferir el hormigón (humedad relativa crítica de 90 a 95%) por sobre, por ejemplo, un tablero de madera (humedad relativa crítica de 75 a 80%).

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Además de la clasificación mencionada se recomienda desarrollar un sistema de clasificado o etiquetado de productos que haga que el diseñador de la vivienda e incluso el futuro propietario sea consciente de las consecuencias de la elección del material del revestimiento.

No se deberían permitir cortinas textiles en baños o zonas húmedas que actúen como acumuladores de humedad.

Preferencia de materiales con ph base:

En el capítulo de las condiciones ambientales se destacó el valor de ph ideal para la formación de moho, si esto se lleva a las condiciones que le puede ofrecer un material, este debería ser con ph base o alcalino que contribuya a la disminución de la formación de moho.

Preferencia de materiales rápidos de secar:

Según lo estudiado por Pasanen et al. (2000) se recomienda que para evitar la proliferación de moho, se debería contar con una primera capa rápida de secar.

Limpieza de las superficies:

Se debería recomendar al usuario mantener las superficies interiores de la vivienda limpias, especialmente las superficies con mayor riesgo de formación de moho como las esquinas, detrás y debajo de muebles, puentes térmicos, borde de aberturas y otros. Como se pudo apreciar en el análisis de sensibilidad realizado y en lo indicado por Weikl et al. (2016), el polvo puede contener esporas y hasta ser el inicio de la germinación del moho por lo que una superficie limpia permitirá disminuir las posibilidades de formación de moho.

Preferencia de materiales con superficies lisas:

Una superficie no rugosa no da cabida a albergar material particulado, polvo, polen u otros contaminantes que transporten esporas hasta la superficie. Además, una superficie lisa es más fácil de limpiar.

Evitar superficies rugosas también contribuirá a evitar microclimas que permitan el desarrollo de moho bajo condiciones ambientales singulares.

Por ejemplo, se recomienda evitar el papel mural rugoso o con relieve que, además de contener celulosa, tiene la posibilidad de albergar material particulado sobre su superficie. Como se revisó en la bibliografía, en el caso de la madera hasta el patrón de aserrado puede facilitar la formación de moho (Johansson 2014).

Como conclusión se tienen tres pilares sobre los cuales se sustentan los criterios de diseño de una envolvente libre de moho. Cada uno de ellos es igual de importante:

Ambiente interior: Dentro de los parámetros ambientales el agua es crucial para la formación de moho, se debe regular los niveles de humedad relativa, contenido de agua inicial de los materiales y los periodos o picos de humedad relativa alta. El camino para lograrlo es la ventilación.

Envolvente térmica: Si se evitan las condensaciones con un factor de resistencia térmica adecuado, para la sección tipo y para los puentes térmicos, se disminuyen las posibilidades de formación de moho. El camino para lograrlo es un buen dimensionamiento de la envolvente térmica y optimización de puentes térmicos.

Sustrato o material de revestimiento de terminación interior: El efecto de la ventilación en ambientes interiores altamente aislados (es decir cumpliendo los dos pilares anteriores) es sólo menor en términos de su potencial para reducir los riesgos de crecimiento de moho. El control real y sostenido del moho en interiores en tales ambientes debe tener en cuenta la dinámica de la humedad interior, es decir, picos cortos de humedad relativa, y por lo tanto debe considerar la aplicación apropiada de materiales de terminación como el instrumento clave Adan et al. (2011). El camino para lograr esto podría ser:

- A) Agrupar los materiales existentes en la base de datos de la herramienta de cálculo estática de condensaciones según su origen y susceptibilidad.
- B) Sistema de etiquetado de materiales comerciales de terminación.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

C) Desarrollar investigaciones sobre la tecnología de materiales, especialmente de terminación. Para cada uno de estos pilares se establecen propuestas específicas sobre los instrumentos y herramientas actualmente existentes, las cuales se proponen modificar y complementar.

7.3. TRABAJOS FUTUROS Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Falta por investigar el mecanismo para transmitir una señal de que la espora ha hecho contacto con la superficie, resultando en la producción y liberación de adhesivo. Si se pudiera cortar este proceso se podría evitar la formación de moho.

El estudio de la biología de los hongos en estas condiciones artificiales es completamente nuevo y abriría una nueva área de investigación.

La capacidad fúngica de influir en el entorno local es una línea de investigación que se debería seguir estudiando.

Se podría realizar un estudio de formación de moho y análisis de sensibilidad sobre partes singulares de la envolvente, como puentes térmicos, donde se evalúe además el efecto por ejemplo de un valor inferior de resistencia térmica al evaluado en esta investigación, las diferencias entre las orientaciones del elemento y fuentes de calor, agua u otros.

El estudio de la ecología de los hongos en material particulado y contaminantes atmosféricos es completamente novedoso y abriría una nueva área de investigación, especialmente debido a la contaminación intradomiciliaria de las viviendas que se encuentran en ciudades saturadas o con PDA.

Sería interesante conocer en detalle las relaciones entre diferentes materiales de terminación y el ambiente interior en relación a las variaciones o fluctuaciones de humedad relativa y la formación de moho.

LISTADO DE FIGURAS

LISTADO DE FIGURAS

Figura N° 1: Mapa de ruta de la investigación..... 19

Figura N° 2: Ciclo de vida asexual del típico mohó. Fuente: Johansson, 2014, ilustración de Agneta Olsson-Jonsson 20

Figura N° 3: Ejemplos de tipos de mohó inoculación in vitro, Fuente: Altamirano, 2016 21

Figura N° 4: Formación de estructura de esporas en *Aspergillus niger*, imagen cryo SEM, escala de 110micras lo que significa que esta estructura es visible directamente. La diferencia en las medidas indica la diferencia de desarrollo de la conidia (espora) (Dijksterhuis, 2011)..... 22

Figura N° 5: Variación de la humedad interior en función de as clases de higrometría y la temperatura exterior (NCh1973.Of2008 en su anexo A) 26

Figura N° 6: La actividad del agua de la solución es igual a la humedad relativa RH (expresada como proporción) sólo cuando se ha establecido un equilibrio y no se produce una transferencia neta de vapor de agua (Adan & Samson, 2011). 27

Figura N° 7: La actividad de agua de un sustrato, ya sea poroso o no poroso, de un material de construcción, sólo puede medirse en caso de equilibrio con el aire por encima de él. En ese caso, el contenido real de humedad del material no cambia (Adan & Samson, 2011)..... 27

Figura N° 8: Un isoterma de absorción típico de un material a base de yeso, que muestra una rama de adsorción y desorción en un bucle de histéresis. (Adan & Samson, 2011) 28

Figura N° 9: Presentación esquemática del TOW (Adan 1994) 30

Figura N° 10: TOW de la superficie del yeso cartón como función de la humedad relativa ambiental después de 10 minutos de humedecimiento con una ducha (Adan 1994) 30

Figura N° 11: Tasa de crecimiento relativo de *Penicillium chrysogenum* sobre yeso cartón simple y recubierto en función del TOW. La línea puntueada representa la predicción de crecimiento asumiendo el estado estacionario de relación de agua (Adan 1994). Obviamente entre más bajo el valor de TOW, el modelo de predicción debe subestimar el crecimiento sobre el yeso, así como entre más alto el valor de TOW, estos deberían poder llevar a sobreestimar al yeso cartón recubierto (Adan et al. 2011) 31

Figura N° 12: Secuencia de adhesión del mohó en la superficie del sustrato para su posterior penetración. Elaboración propia a partir de Fungal adhesion, (Jones, 1994) 34

Figura N° 13: Ascospora (una espora dentro de una asca) con una vaina en forma de extremidades en forma de almohadilla (flechas negras) que se adhiere al sustrato y a la extremidad secundaria mucilaginosa (flecha M) (Jones, 1994)..... 35

Figura N° 14: Colonización en tejido pulmonar de *Aspergillus* (Web Animated Dissection of Anatomy for Medicine A.D.A.M.) 36

LISTADO DE FIGURAS

Figura N° 15: Radiografía del desarrollo de Aspergilosis Broncopulmonar Alergica (ABPA) en un paciente durante 4 años. (Graham Atherton, 2019)..... 37

Figura N° 16: Aspergillus es uno de los principales grupos de hongos responsables de la producción de micotoxinas nocivas para plantas y animales (<https://es.wikipedia.org/wiki/Micotoxina>) 39

Figura N° 17: Ejemplo de micotoxicosis: ergotismo gangrenoso (<https://es.wikipedia.org/wiki/Micotoxina>) 40

Figura N° 18: Esquemas de prueba utilizados (P. Johansson et al. 2013) 43

Figura N° 19: Mediana de la tasa de crecimiento del moho a lo largo del tiempo para todas las superficies probadas cuando la humedad relativa se alternó (P. Johansson, 2013)..... 44

Figura N° 20: Mediana de la tasa de crecimiento del moho a lo largo del tiempo para todas las superficies probadas cuando la temperatura se alternó (P. Johansson et al., 2013)..... 45

Figura N° 21: Resistencia al vapor de agua (μ) de los papeles murales estudiados..... 46

Figura N° 22: Función de almacenaje de agua de los papeles murales estudiados. 47

Figura N° 23: Estados de crecimiento de *Penicillium Chrysogenum* (CBS 52E8) en yeso puro con nutrientes adicionales, incubación a 21 °C y 97% RH en la oscuridad. (A) Conidios en la superficie del yeso, inóculo inicial, 15 min. (B) Conidio inflamado con tubo de germinación, 23 h. (C) Crecimiento de hifas extendido, 45 h. (D) Formación de hifas aéreas, 51 h. (E) Conidióforo esporulador, 69 h. (F) Masa micelial, con conidióforos esporuladores, que cubren el sustrato, 73 h (Adan & Samson, 2011)..... 48

Figura N° 24: Variación de conductividad térmica de una plancha de yeso cartón en relación a su contenido de agua. 49

Figura N° 25: Variación del factor de resistencia al vapor de agua en relación a la humedad relativa contenida. 49

Figura N° 26: Diagrama de flujo que muestra el proceso iterativo en el que se basa el método de simulación numérica (Künzel, 1995)..... 52

Figura N° 27: Marco de cálculo computacional de moho para los modelos MRD, m-model y VTT..... 54

Figura N° 28: Fuentes de incertezas en el desempeño de la evaluación del riesgo de crecimiento de moho (Moon & Augenbroe, 2005) 55

Figura N° 29: Germinación de esporas y crecimiento sobre distintos grupos de sustratos (Seldbauer, 2001) 56

Figura N° 30: Nomograma para determinar la humedad relativa máxima admisible de la habitación, ambos que exceden la formación de moho se producen en una pared exterior, a una temperatura ambiente de aire de 16 °C (izquierda) y 20 °C (derecha) (Seldbauer, 2001) 58

Figura N° 31: Algoritmo de diseño físico constructivo (modelamiento del paquete WP2) (Hangentoft, 2002)... 59

LISTADO DE FIGURAS

Figura N° 32: Imagen del análisis termográfico y ambiental del modelo higrotérmico en Delphin. (www.http://bauklimatik-dresden.de/delphin/screenshots.php)	60
Figura N° 33: Planes de Descontaminación Atmosférica (mma.gov.cl,2019)	68
Figura N° 34: Ejemplo: cambio de aire resultante en relación con la superficie de la vivienda y el volumen de aire para ventilación continua (altura promedio de recinto de 2,50m) (DIN 4108-8:2010)	80
Figura N° 35: Humedad absoluta en relación con la temperatura ambiental (DIN 4108-8:2010).....	80
Figura N° 36: Esta figura puede utilizarse junto con las figuras 35 y 36 para sacar conclusiones sobre el contenido de humedad del edificio en relación con el uso de la vivienda y la liberación de humedad asociada al crecimiento de moho. La figura 35 también permite convertir el flujo volumétrico en un cambio de aire (DIN 4108-8:2010)	81
Figura N° 37: Temperatura y humedad relativa durante el año en Concepción (NCh1079:2008)	83
Figura N° 38: Corte constructivo del caso de estudio	83
Figura N° 39: Perfiles de presión de vapor de agua EAC	85
Figura N° 40: Perfiles de presión de vapor de agua PMV	86
Figura N° 41: Perfiles de presión de vapor de agua EAA.....	87
Figura N° 42: Perfiles de presión de vapor de agua PMC.....	88
Figura N° 43: Temperatura ambiental exterior anual de Concepción.	90
Figura N° 44: Humedad relativa ambiental exterior anual de Concepción.	90
Figura N° 45: Radiación global anual de Concepción.	90
Figura N° 46: Clase higrométrica 4, ISO 13788.....	91
Figura N° 47: Temperatura y humedad relativa ambiental interior considerada.	91
Figura N° 48: Contenido total de agua (Kg/m ²) EAC	92
Figura N° 49: Contenido de agua capa yeso cartón (Kg/m ²) EAC	93
Figura N° 50: Isopletas de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM _{bau}) EAC	93
Figura N° 51: Contenido de agua de la espesa vs. contenido crítico de agua (Kg/m ³) EAC.....	94
Figura N° 52: Tasa de crecimiento del moho (mm) EAC.....	94
Figura N° 53: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, EAC	94
Figura N° 54: Índice de moho (-) EAC	94
Figura N° 55: Contenido total de agua (Kg/m ²) PMV.....	95

LISTADO DE FIGURAS

Figura N° 56: Contenido de agua capa yeso cartón (Kg/m ²) PMV	95
Figura N° 57: Isopletras de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM _{bau}) PMV	96
Figura N° 58: Contenido de agua de la espesa vs. contenido crítico de agua (Kg/m ³) PMV	96
Figura N° 59: Tasa de crecimiento del moho (mm) PMV	96
Figura N° 60: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, PMV	97
Figura N° 61: Índice de moho (-) PMV	97
Figura N° 62: Contenido total de agua (Kg/m ²) EAA	97
Figura N° 63: Contenido de agua capa yeso cartón (Kg/m ²) EAA	98
Figura N° 64: Isopletras de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM _{bau}) EAA.	98
Figura N° 65: Contenido de agua de la espesa vs. contenido crítico de agua (Kg/m ³) EAA.	99
Figura N° 66: Tasa de crecimiento del moho (mm) EAA	99
Figura N° 67: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, EAA	99
Figura N° 68: Índice de moho (-) EAA	99
Figura N° 69: Contenido total de agua (Kg/m ²) PMC	100
Figura N° 70: Contenido de agua capa yeso cartón (Kg/m ²) PMC	100
Figura N° 71: Isopletras de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM _{bau}) PMC	101
Figura N° 72: Contenido de agua de la espesa vs. contenido crítico de agua (Kg/m ³) PMC	101
Figura N° 73: Tasa de crecimiento del moho (mm) PMC	101
Figura N° 74: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, PMC	102
Figura N° 75: Índice de moho (-) PMC	102
Figura N° 76: Ubicación de la cámara de simulación de clima CITEC, en la ciudad de Concepción Google Earth)	103
Figura N° 77: Cámara de simulación de clima del CITEC	103
Figura N° 78: Fotografías de las etapas de la construcción del muro del caso de estudio.	104
Figura N° 79: Fotografías de la medición de variables sobre el muro tipo y sus 4 diferentes recubrimientos. .	105
Figura N° 80: Dielectric Leaf Wetness Sensor, sensor hoja de humedad dielectrico utilizado para el registro de condensaciones (Decagon Devices, Inc., 2016)	105
Figura N° 81: Registro típico de una hoja (Decagon Devices, Inc., 2016)	106

LISTADO DE FIGURAS

Figura N° 82: Humedad relativa ambiental registrada.....	106
Figura N° 83: Temperatura ambiental registrada.....	107
Figura N° 84: Temperaturas superficiales registradas.	108
Figura N° 85: Condensaciones superficiales registradas, periodo completo.	109
Figura N° 86: Contenido de agua total (arriba) y de la capa de yeso cartón (abajo) para EAC (izquierda) y EAA (derecha).	112
Figura N° 87: Comparación de las tasas de crecimiento del moho (mm).	113
Figura N° 88: Índice de moho (-).....	113
Figura N° 89: Isopletras de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM _{bau}) Caso A.....	115
Figura N° 90: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso A.	116
Figura N° 91: Índice de moho (-) Caso A.....	116
Figura N° 92: Isopletras de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM _{bau}) Caso B.....	116
Figura N° 93: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso B.	117
Figura N° 94: Índice de moho (-) Caso B.....	117
Figura N° 95: Isopletras de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM _{bau}) Caso C.....	117
Figura N° 96: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso C.	118
Figura N° 97: Índice de moho (-) Caso C.....	118
Figura N° 98: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso D.....	118
Figura N° 99: Comparación de índices de crecimiento de moho.	119
Figura N° 100: variación de la tasa de crecimiento de moho, parámetros de WUFI Pro.....	120
Figura N° 101: variación del índice de crecimiento de moho, parámetros de WUFI Pro, WUFI Bio y WUFI VTT.	121
Figura N° 102: Temperatura superficial interior vs. temperatura punto de rocío.....	124
Figura N° 103: Detalle de tres días de temperaturas superficial interior y de punto de rocío.....	125
Figura N° 104: Registro de condensaciones superficiales del periodo en detalle.....	126
Figura N° 105: Registro de condensaciones superficiales del periodo en detalle.....	127
Figura N° 106: Registro de condensaciones superficiales del periodo en detalle.....	128

LISTADO DE FIGURAS

Figura N° 107: Registro de condensaciones superficiales vs. humedad relativa interior	129
Figura N° 108: Registro de condensaciones superficiales vs. humedad relativa interior en detalle	130
Figura N° 109: Gráfico de dispersión de correlación de variables	135
Figura N° 110: Gráfico de regresión modelo predictivo de Wyc en base a Sd.....	137
Figura N° 111: Gráfico de regresión modelo predictivo de RC en base a Sd.....	138
Figura N° 112: Gráfico de regresión modelo predictivo de RC en base a IC	138
Figura N° 113: Imagen referencial de la herramienta de cálculo con las propuestas de mejora.	147
Figura N° 114: Contenido total de agua (Kg/m ²) Caso 1.....	168
Figura N° 115: Isopletras de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM _{bau}) Caso 1.....	168
Figura N° 116: Contenido de agua de la espesa vs. contenido crítico de agua (Kg/m ³) Caso 1.	169
Figura N° 117: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso 1.	169
Figura N° 118: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.	169
Figura N° 119: Índice de moho (-) Caso 1.	169
Figura N° 120: Contenido total de agua (Kg/m ²) Caso 1.....	170
Figura N° 121: Isopletras de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM _{bau}) Caso 1.....	170
Figura N° 122: Contenido de agua de la espesa vs. contenido crítico de agua (Kg/m ³) Caso 1.	171
Figura N° 123: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso 1.	171
Figura N° 124: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.....	171
Figura N° 125: Índice de moho (-) Caso 1.....	171
Figura N° 126: Contenido total de agua (Kg/m ²) Caso 1.....	172
Figura N° 127: Isopletras de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM _{bau}) Caso 1.....	172
Figura N° 128: Contenido de agua de la espesa vs. contenido crítico de agua (Kg/m ³) Caso 1.	173
Figura N° 129: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso 1.	173
Figura N° 130: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.....	173
Figura N° 131: Índice de moho (-) Caso 1.....	173
Figura N° 132: Contenido de agua de la espesa vs. contenido crítico de agua (Kg/m ³) Caso 1.	174
Figura N° 133: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso 1.	174

LISTADO DE FIGURAS

Figura N° 134: Índice de moho (-) Caso 1.....	174
Figura N° 135: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.....	175
Figura N° 136: Índice de moho (-) Caso 1.....	175
Figura N° 137: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.....	175
Figura N° 138: Índice de moho (-) Caso 1.....	176
Figura N° 139: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.....	176
Figura N° 140: Índice de moho (-) Caso 1.....	176
Figura N° 141: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.....	177
Figura N° 142: Índice de moho (-) Caso 1.....	177

LISTADO DE TABLAS

LISTADO DE TABLAS

Tabla N° 1: Palabras claves utilizadas en la búsqueda del estado del arte.	16
Tabla N° 2: Clases de higrometría interior. Fuente: NCh1973.Of2008, anexo A.....	25
Tabla N° 3: Ejemplos de estudios de crecimiento de moho en laboratorio sobre varios materiales de construcción.	33
Tabla N° 4: Especies de mohos comunes en ambientes interiores (Adan et al.,2011)	40
Tabla N° 5: Especies de mohos comunes que se repiten (izquierda) y su nombre antiguo incorrecto (derecha) (Adan et al.,2011)	41
Tabla N° 6: Resumen las metodologías de evaluaciones higrotérmicas existentes y su comparación (Little et al. 2015).....	50
Tabla N° 7: Características del material considerado en el software WUFI	51
Tabla N° 8: métodos de predicción de crecimiento de moho y sus desarrolladores	53
Tabla N° 9: Niveles de Índice de crecimiento de moho VTT (MGI) (Ojanen et al. 2010)	61
Tabla N° 10: Transmitancia y resistencia térmica para cada zona climática (Art. 4.1.10. OGUC, MINVU)	63
Tabla N° 11: Propiedades materiales, símbolos y valores de diseño (NCh1973:2014)	64
Tabla N° 12: Transmitancia térmica envolvente máxima PDA Temuco y Padre Las Casas	68
b) Tabla N° 13: valor R100 mínimo PDA Temuco y Padre Las Casas	68
Tabla N° 14: Tabla N°22. Infiltraciones de aire máxima vivienda PDA Temuco y Padre Las Casas	69
Tabla N° 15: Tabla N°23. Grado de estanqueidad al viento puertas y ventanas PDA Temuco y Padre Las Casas	69
Tabla N° 16: Especies consideradas en la norma.	76
Tabla N° 17: Cálculo de transmitancia térmica del muro del caso de estudio según NCh853	84
Tabla N° 18: características de los revestimientos utilizados en los cálculos teóricos y experimentales.....	84
Tabla N° 19: Resumen evaluación de condensaciones superficiales e intersticiales EAC.....	86
Tabla N° 20: Resumen evaluación de condensaciones superficiales e intersticiales PMV	87
Tabla N° 21: Resumen evaluación de condensaciones superficiales e intersticiales EAA.....	88
Tabla N° 22: Resumen evaluación de condensaciones superficiales e intersticiales PMC.....	89
Tabla N° 23: Identificación del revestimiento y sección de las temperaturas superficiales registradas.	107

LISTADO DE TABLAS

Tabla N° 24: Identificación del revestimiento y sección de las condensaciones superficiales registradas.....	108
Tabla N° 25: Resumen evaluación de condensaciones superficiales e intersticiales	110
Tabla N° 26: Cuadro comparativo simulación dinámica de los revestimientos evaluados.....	114
Tabla N° 27: matriz de resumen de datos de entrada variados y resultados obtenidos casos base, A, B y C.	122
Tabla N° 28: matriz de resumen de datos de entrada variados y resultados obtenidos casos base, D, E, F, G, H y I (F+G+H).....	123
Tabla N° 29: Registros y resultados experimento en laboratorio.	131
Tabla N° 30: Matriz de comparación de resultados de los cálculos y evaluaciones experimentales realizadas	131
Tabla N° 31: Base de datos disponible y tipos de variables	134
Tabla N° 32: estadística descriptiva.....	135
Tabla N° 33: Correlación entre las variables.....	136
Tabla N° 34: modelación estadística	136

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Adan OCG (1994) On the fungal defacement of interior finishes. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands, 224 pp.

Adan, O.C.G., Huinink, H.P., y Bekker, M. (2011) Water relations of indoor fungi. In *Fundamentals of Mold Growth in Indoor Environments and Strategies for Healthy Living*. Adan, O.C.G., and Samson, R.A. (eds). Wageningen: Wageningen Academic Publishers, pp. 41–65.

Adan, O., & Samson, R. (2011). *Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living*. In *Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living*. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-722-6>

Aktas, Y. D., Ioannou, I., Altamirano-Medina, H., Reeslev, M., D’Ayala, D., May, N., & Canales, M. (2018). Surface and passive/active air mould sampling: A testing exercise in a North London housing estate. *Science of the Total Environment*, 643, 1631–1643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.311>

Altamirano, H. (2016). *Mould in Buildings: Implications and Causes in Occupied Spaces*. 12th PCA Conference. UCL Institute for Environmental Design and Engineering.

Andersen, B., Frisvad, J.C., Sondergaard, I., Rasmussen, I.S., y Larsen, L.S. (2011) Associations between fungal species and water-damaged building materials. *Appl Environ Microbiol*, 77: 4180–4188.

Ayerst G (1969) The effects of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. *J Stored Prod Res* 5: 127-141.

Baukh V, Huinink HP, Erich SJF, Adan OCG y van der Ven LGJ (2010) NMR imaging of water uptake in multilayer polymeric films: stressing the role of mechanical stress. *Macromolecules* 43: 3882- 3889.

Becker, R., Puterman, M., & Laks, J. (1986). EFFECT OF POROSITY OF EMULSION PAINTS ON MOULD GROWTH. *Durability of Building Materials*.

Becker R y Puterman M (1987) Verhütung von Schimmelbildung in Gebäuden. Teil 2: Einfluß der Oberflächenmaterialien. *Bauphysik* 4: 107-110.

Bok G, Hallenberg N y Åberg O (2009) Mass occurrence of *Penicillium corylophilum* in crawl spaces, south Sweden. *Building and Environment*, 44(12):2413-2417.

BSI, 2007. BS EN 15026:2007: Hygrothermal performance of building components and building elements: Assessment of moisture transfer by numerical simulation. London, UK: BSI.

BSI, 2011. BS 5250:2011: Code of practice for control of condensation in buildings. London, UK: BSI.

Burge, H. A. (2002). An Update on Pollen and Fungal Spore Aerobiology. *Journal Of Allergy and Clinical Immunology*. Vol. 110 (4), pp.544-552.

BIBLIOGRAFÍA

Bustamante, W., Rozas, Y., Cepeda, R., Encinas, F., & Martínez, P. (2009). Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social, DITEC Ministerio de Vivienda y Urbanismo, & Programa País de Eficiencia Energética. Eds., Pontificia Universidad Católica de Chile; 75. <https://doi.org/10.13140/2.1.2184.3847>

Caddick M X (1993) Perception and Response: Phenotypic Plasticity in Fungi. In Stress Tolerance of Fungi. Ed: Jennings D, Marcel Dekker, Inc

Chen, G., Luo, Q., Guo, X., Liu, X., Tu, M., & He, Y. (2017). Study on mould germination risk in hygroscopic building wall. *Procedia Engineering*, 205, 2712–2719. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.193>

Decagon Devices, Inc. (2016). Manual de operación Dielectric Leaf Wetness Sensor.

Dekker C, Dales R, Bartlett S, Brunekreef B y Zwanenburg H (1991) Childhood asthma and the indoor environment. *Chest* 100: 922-926.

DIN 4108-3:2014, Protección térmica y ahorro energético en edificios, Parte 3: Protección contra la humedad relacionada con el clima – Exigencias, métodos de cálculo y directrices para la planificación y ejecución. © DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

DIN 4108-8:2010, Protección térmica y ahorro energético en edificios, Parte 8: Prevención del crecimiento de moho en edificios residenciales. © DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

Eagen R, Brisson A y Breuil C (1997) The sap-staining fungus *Ophiostoma piceae* synthesizes different types of melanin in different growth media. *Canadian Journal of Microbiology* 43(6): 592-595.

EN ISO 13788:2016, Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods.

Flannigan B y Miller J D (2011) Microbial Growth in Indoor Environments. In: Microorganisms In Home and Indoor Work Environments. Diversity, health impacts, investigation and control. Ed: Flannigan B, Samson R A and Miller J D. New York, CRC Press LLC: 35-67.

Fleet C, Breuil C y Uzunovic A (2001) Nutrient Consumption and Pigmentation of Deep and Surface Colonizing Sapstaining Fungi in *Pinus contorta*. *Holzforschung* 55(4): 371-378.

Fog Nielsen y Jens C. Frisvad (2011) Mycotoxins on building materials, In: Fundamentals of mold growth in indoor environments, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark

Francis A (1987) Schimmelproblemen in gebouwen. Determinatie, groei-omstandigheden, gevoeligheid van diverse afwerkingen, bestrijding. PhD Tesis, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium.

Frazier W y Westhoff D (1988) Food Microbiology. McGraw-Hill Book Company, New York, U.S.A.

Gadd G M (1980) Melanin production and differentiation in batch cultures of the polymorphic fungus *Aureobasidium pullulans*. *FEMS Microbiology Letters* 9(3): 237-240.

Golofit-Szymczak, Malgorzata; Gorny, Rafal L. (2018) Microbiological air quality in office buildings equipped with different ventilation systems. *INDOOR AIR* Volumen: 28 Número: 6 Páginas: 792-805.

BIBLIOGRAFÍA

Gradeci, K., Labonnote, N., Time, B., & Köhler, J. (2017). A probabilistic-based approach for predicting mould growth in timber building envelopes: Comparison of three mould models. *Energy Procedia*, 132, 393–398. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.641>

Graham Atherton (2019); Damp homes and Health, National Aspergillosis Centre, Universidad de Manchester. In: UK Centre for Moisture in Buildings 2019 Annual Conference - Challenges and Opportunities: Moisture and the Built Environment. University College London, Building Research Establishment.

Grant C, Hunter CA, Flannigan B y Bravery AF (1989) Te moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings. *Int Biodeterioration* 25: 259-284.

Grinbergs L, Hyppel A, Höglund I y Ottoson G (1993) Wet-room wall systems – Mould resistance. In: Erhorn H, Reiß J y Szerman M (eds.), *Proceedings of the International Symposium Energy Efficient Buildings (Design, Performance and Operation) of the CIB Working Commission W67 “Energy Conservation in the Built Environment” and IEA-SHC Working Task Group XIII “Low Energy Buildings”*, March 9-11, Leinfelden-Echterdingen, Germany, IRB Verlag, Stuttgart, Germany

Ho, S., Jun, H., & Tai, J. (2015). Evaluation of the influence of hygric properties of wallpapers on mould growth rates using hygrothermal simulation. *Energy & Buildings*, 98, 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.058>

Howard, R. J., Bourett, T.M. & Ferrari, M.A. (1991). Infection by Magnaporthe: an in vitro analysis. In *Electron Microscopy of Plant Pathogens* (ed. K. Mendgen & D.-E. Lesemann), pp. 251-264. Springer-Verlag: New York.

Janssen, Hans (2011) Thermal diffusion of water vapour in porous materials: Fact or fiction? *International Journal of Heat and Mass transfer*, Volumen: 54 Número: 7-8 Páginas: 1548-1562.

Johansson P, Samuelson I, Ekstrand-Tobin A, Mjörnell K, Sandberg, P. I, and Sikander E. (2005). Microbiological growth on building materials – critical moisture levels. State of the art. SP RAPPORT 2005:11. SP Swedish National Testing and Research Institute.

Johansson, P. (2014). Determination of the critical moisture level for mould growth on building materials (Lund University; Vol. 1020). Retrieved from <https://lup.lub.lu.se/search/publication/4406856>

Johansson, P., Svensson, T., & Ekstrand-tobin, A. (2013). Validation of critical moisture conditions for mould growth on building materials. *Building and Environment*, 62, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.012>

Jones, E. B. G. (1994). Fungal adhesion. *Mycological Research*, 98(9), 961–981. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)80421-8](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)80421-8)

Künzel, H. M. (1995). Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and two-dimensional calculation using simple parameters - www.hoki.ibp.fraunhofer.de/ibp/publikationen/dissertationen/hk_dissertation_e.pdf. In *Physics* (Vol. 1995). <https://doi.org/ISBN v.3-8167-4103-7>

Künzel (1995) y Karagiozis et al. (2001), WUFI (R) de simulación higrótérmica numérica. Fraunhofer Institut für Bauphysik.

BIBLIOGRAFÍA

Little, J., Ferraro, C., & Aregi, B. (2015). Technical Paper 15: Assessing risks in insulation retrofits using hygrothermal software tools. Heat and moisture transport in internally insulated stone walls. Technical Paper 15. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2493.3844>

Magan N y Lacey J (1984) Efect of temperature and pH on water relations of field and storage fungi. *Trans Br Mycol Soc* 82: 71-81.

Mercado, J. (2018). Evaluación de riesgos de condensación superficial e intersticial en muros exteriores de viviendas sociales con estándar definido en el Plan de Descontaminación Atmosférica en la comuna de Valdivia, Chile, Tesis Magíster Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética, Universidad del Bío.

Miller JD (2011) Mycological investigations of indoor environments. In: Flannigan B, Samson RA y Miller JD (eds.) *microorganisms in home and indoor work environments: diversity, health impacts, investigations and control*. Taylor and Francis, Abingdon, UK.

Ministerio de Medio Ambiente, (2015). Artículo N°32, D.S. N°08, Plan de Descontaminación Atmosférica por MP2,5 para las comunas de Temuco y padre Las Casas.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo, (2018). Resolución Exenta N°009868, Parte B Riesgo de Condensación.

Møller, E. B., Andersen, B., Rode, C., & Peuhkuri, R. (2017). Conditions for mould growth on typical interior surfaces. *Energy Procedia*, 132, 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.680>

Moon, H. J., Augenbroe, G. (2003). Development of a Performance Indicator for Mold Growth Risk Avoidance in Buildings. *Proceedings of the Healthy Building*. Singapore.

Moon, H. J., & Augenbroe, G. (2005). Assessing mold risks in buildings under uncertainty. *Georgia Institute of Technology*.

Morgenstern J (1982) Einfluß von Polyvinylacetat-Zusätzen in Putzmörtel auf die Schimmelbildung. *Material und Organismen* 17: 241-251.

Muñoz, C., & Bobadilla, A. (2012). Simulación y evaluación de puentes térmicos soluciones constructivas típicas aprobadas por la norma térmica para elementos verticales en estructura de madera y metálicos en la zona 4 simulaciones con therm y usai y evaluación con método de cámara térmica. *Revista de La Construcción*, 11(2), 92–111. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2012000200009>

Nielsen KF, Holm G, Uttrup LP y Nielsen PA (2004) Mold growth on building materials under low water activities – influence of humidity and temperature on fungal growth and secondary metabolism. *Int Biodeter Biodeg* 54: 325-336.

Nielsen KF, Huttunen K, Hyvärinen A, Andersen B, Jarvis BB y Hirvonen M-R (2001) Metabolite profiles of *Stachybotrys* spp. isolates from water damaged buildings, and their capability to induce cytotoxicity and production of inflammatory mediators in RAW 264.7 macrophages. *Mycopathologia* 154: 201-205.

Norma chilena NCh 1079:2008, Zonificación climática de Chile, Instituto Nacional de Normalización, 2008.

BIBLIOGRAFÍA

Norma chilena NCh 1973.Of.2014, Comportamiento higrotérmico de elementos y componentes de construcción – Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial – Método de cálculo, Instituto Nacional de Normalización.

Norma chilena NCh 2457:2001, Materiales de construcción y aislación – Determinación de la permeabilidad al vapor de agua (humedad), Instituto Nacional de Normalización.

Norma chilena NCh 853.Of.2007, Acondicionamiento térmico – Envoltente térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas. Instituto Nacional de Normalización.

O’Driscoll BR, Hopkinson LC y Denning DW (2005) Mold sensitization is common amongst patients with severe asthma requiring multiple hospital admissions. *BMC Pulm Med* 5: 4.

Park D (1982) Phylloplane fungi: Tolerance of hyphal tips to drying. *Transactions of the British Mycological Society* 79(1): 174-178.

Pasanen, A. L., Kasanen, J. P., Rautiala, S., Ikäheimo, M., Rantamäki, J., Kääriäinen, H., & Kalliokoski, P. (2000). Fungal growth and survival in building materials under fluctuating moisture and temperature conditions. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46(2), 117–127. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00093-7](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00093-7)

Rahardjo YSP, Weber FJ, Le Comte EP, Tramper J and Rinzema A (2002) Contribution of aerial hyphae of *Aspergillus oryzae* to respiration in a model solid-state fermentation system. *Biotechnol Bioeng* 8: 539-544.

Read ND, Porter R y Beckett A (1983) A comparison of preparative techniques for the examination of the external morphology of fungal material with the scanning electron microscope. *Can J Bot* 61: 2059-2078.

Rönmark E, Jönsson E, Platts-Mills T, Lundbäck B (1999) Different pattern of risk factors for atopic and nonatopic asthma among children – report from the Obstructive Lung Disease in Northern Sweden study. *Allergy* 54: 926-935.

Samson RA, Flannigan B, Flannigan ME, Verhoef AP, Adan OCG y Hoekstra ES (eds.) (1994) Health implications of fungi in indoor environments. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.

Samson RA, Houbraken J, Trane U, Frisvad JC y Andersen B (2010) Food and indoor fungi. CBS laboratory manual series 2. Centraalbureau voor Schimmelcultures, Utrecht, the Netherlands.

Scott WJ (1957) Water relations of food spoilage microorganisms. In: Mark EM y Steward GF (eds.), *Advances in food research*. Academic Press, New York, NY, USA, pp. 83-127.

SEDLBAUER, K. (2001) Prediction of mould fungus formation on the surface of/and inside building component, Tesis doctoral, Universidad de Stuttgart, Fraunhofer Institute for Building Physics.

Simon-Nobbe B, Denk U, Pöll V, Rid R y Breitenbach M (2008) Te spectrum of fungal allergy. *Int. Arch Allergy Immunol* 145: 58-86.

Spitzner, M. y De Anda, L. (2011) Evitar el moho en recintos habitables, Beuth kompakt.

BIBLIOGRAFÍA

Sunesson A-L, Nilsson C-A, Carlson R, Blomquist G y Andersson B (1997) Production of volatile metabolites from *Streptomyces albidofavus* cultivated on gypsum board and tryptone glucosa extract agar – influence of temperature, oxygen and carbon dioxide levels. *Ann Occup Hyg* 41: 393-413.

Tomson W (1871) On the equilibrium of vapour at a curved surface of liquid. *Philosophical Magazine Series 4* – 42: 448-452.

Van der Well GK y Adan OCG (1999) Moisture in organic coatings – a review. *Progr in Organic Coatings* 37: 1-14.

van Laarhoven, K. A., Huinink, H. P., Segers, F. J. J., Dijksterhuis, J., & Adan, O. C. G. (2015). Separate effects of moisture content and water activity on the hyphal extension of *Penicillium rubens* on porous media. *Environmental Microbiology*, 17(12), 5089–5099. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13012>

Van Wetter MA, Wösten HAB, Sietsma JH y Wessels JG (2000) Hydrophobin gene expression affects hyphal wall composition in *Schizophyllum commune*. *Fungal Genet Biol* 31: 99-104.

Vereecken, E., & Roels, S. (2012). Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.003>

Viitanen HA (1997) Modelling the time factor in the development of mould fungi – the effect of critical humidity and temperature conditions on pine and spruce sapwood. *Holzforschung* 51: 6-14.

Viitanen, H. and Ojanen, T. (2007) Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials. *Proceedings: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings X*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Weikl, F., Tischler, C., Probst, A. J., Heinrich, J., Markevych, I., Jochner, S., & Pritsch, K. (2016). Fungal and bacterial communities in indoor dust follow different environmental determinants. *PLoS ONE*, 11(4), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154131>

Wessen, B., (2006). *The Microbial Flora in Moisture Damaged Building Material from Swedish Problem Buildings*. Healthy Buildings, Lisboa.

Who (2009). WHO guidelines for indoor air quality dampness and mould. WHO Regional Office for Europe.

Zureik M, Neukirch C, Leynaert B, Liard R, Bousquet J y Neukirch F (2002) Sensitisation to airborne moulds and severity of asthma: cross sectional study from European Community respiratory healthsurvey. *BMJ* 325: 411-414.

ANEXOS

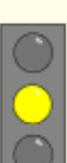
ANEXOS

Anexo 1: Escalas y referencias de indicadores de crecimiento de moho

Para el gráfico obtenido de WUFI Bio que indica la tasa de crecimiento de moho se cuenta con la siguiente escala y referencia de color de semáforo:

	Periodo de cálculo menor a 1 año. No se puede evaluar.
	Crecimiento de moho excede los 200 mm/año, corresponde a un índice de moho de aproximadamente 2. Usualmente no aceptable.
	Crecimiento de moho entre 50 mm/año y 200 mm/año. Criterios adicionales o investigaciones se necesitan para una evaluación aceptable.
	Crecimiento de moho bajo 50 mm/año, corresponde a un índice de moho de aproximadamente 0,5. Usualmente aceptable.

Para el gráfico obtenido de WUFI VTT que indica el índice de moho se cuenta con la siguiente escala y referencia de color de semáforo:

	Periodo de cálculo menor a 1 año. No se puede evaluar.
	Superficie interior: índice de moho sobre 2 Dentro de construcción: índice de moho sobre 3 ASHRAE 160: índice de moho sobre 3 Usualmente no aceptable.
	Superficie interior: índice de moho entre 1 y 2 Dentro de construcción: índice de moho entre 2 y 3 Impacto no esperado: índice de moho sobre 3 ASHRAE 160: índice de moho entre 1 y 3 (no clasificado acordadamente en ASHRAE 160) Criterios adicionales o investigaciones se necesitan para una evaluación aceptable.
	Superficie interior: índice de moho bajo 1 Dentro de construcción: índice de moho bajo 2 Impacto no esperado: índice de moho bajo 3 ASHRAE 160: índice de moho bajo 1 Usualmente aceptable.

ANEXOS

Anexo 2: Resultados completos análisis de sensibilidad cálculo dinámico

Caso A:

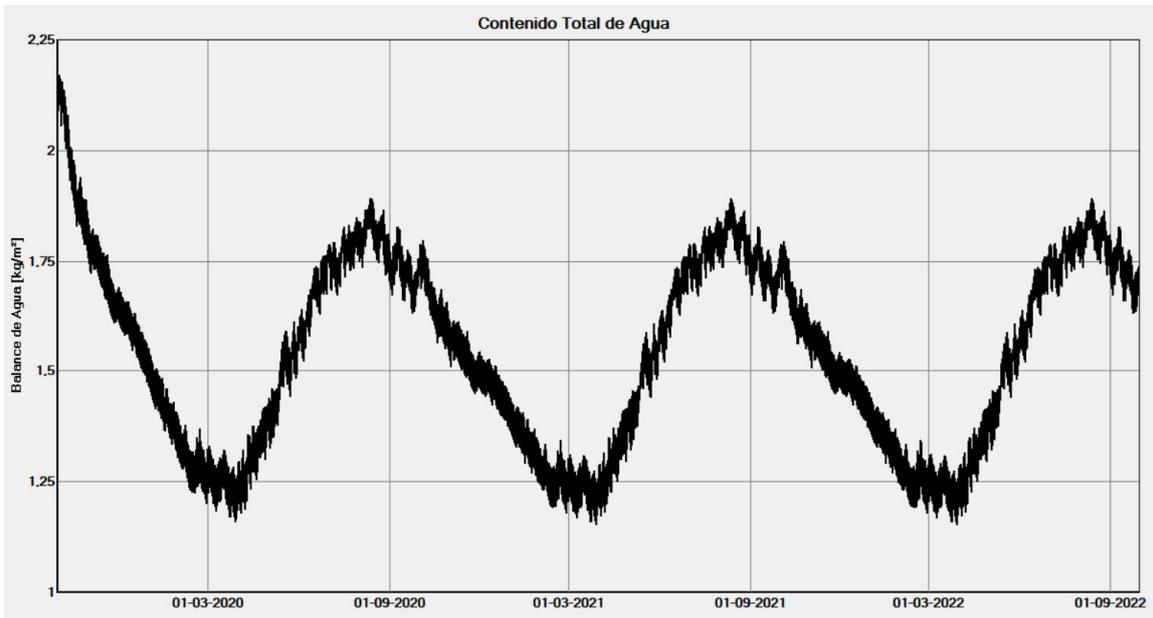


Figura N° 114: Contenido total de agua (Kg/m2) Caso 1.

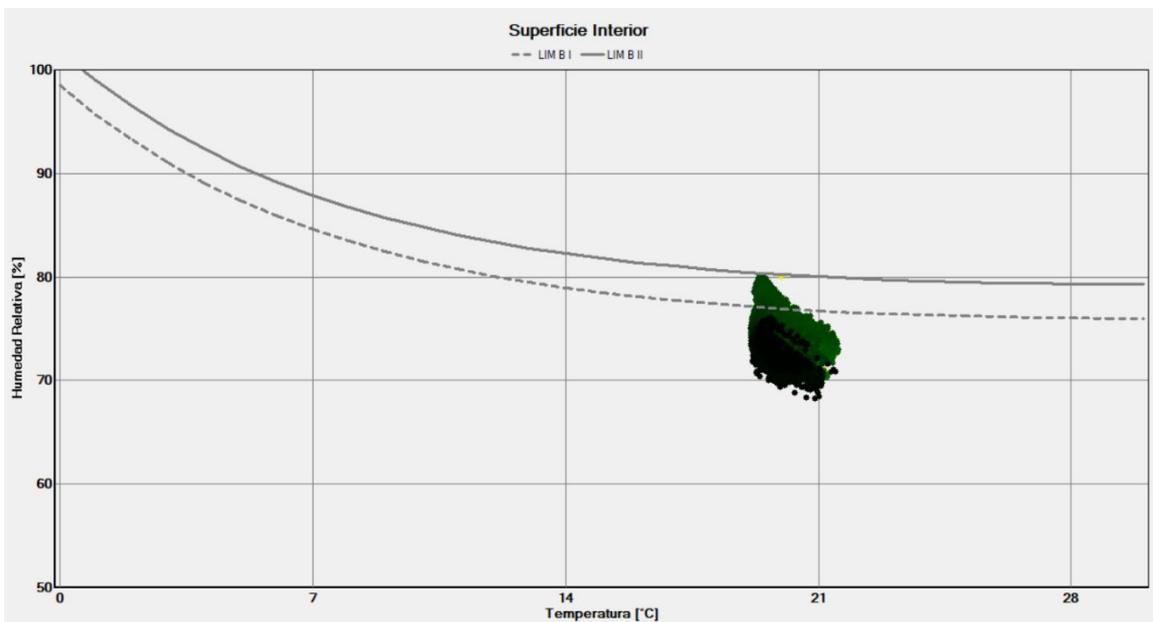


Figura N° 115: Isopletas de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM_{bau}) Caso 1.

ANEXOS

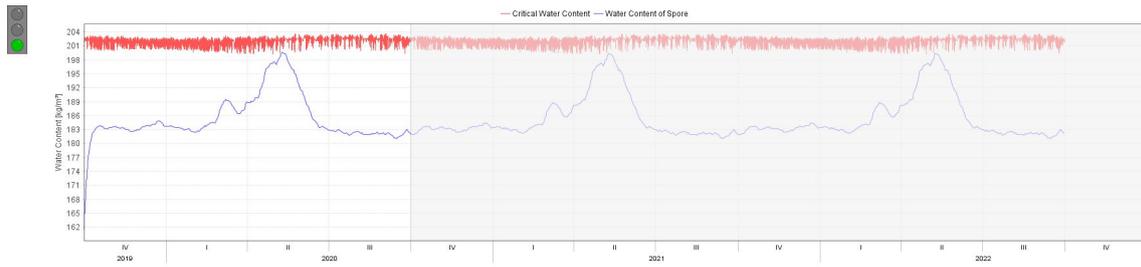


Figura N° 116: Contenido de agua de la espora vs. contenido crítico de agua (Kg/m3) Caso 1.

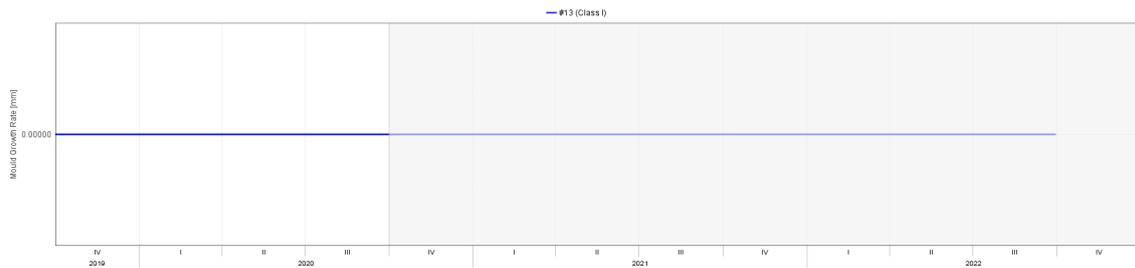


Figura N° 117: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso 1.

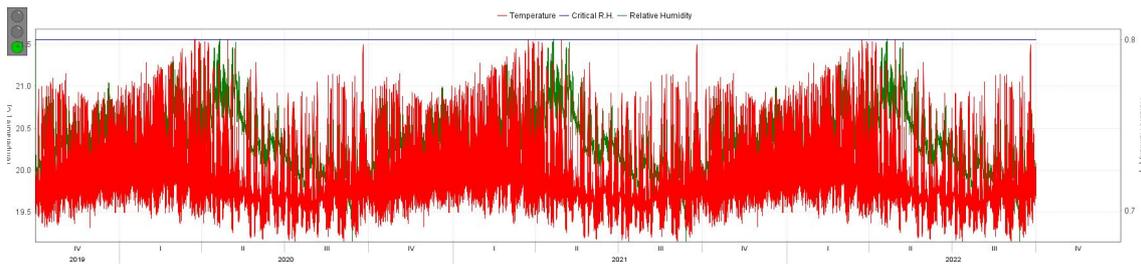


Figura N° 118: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.

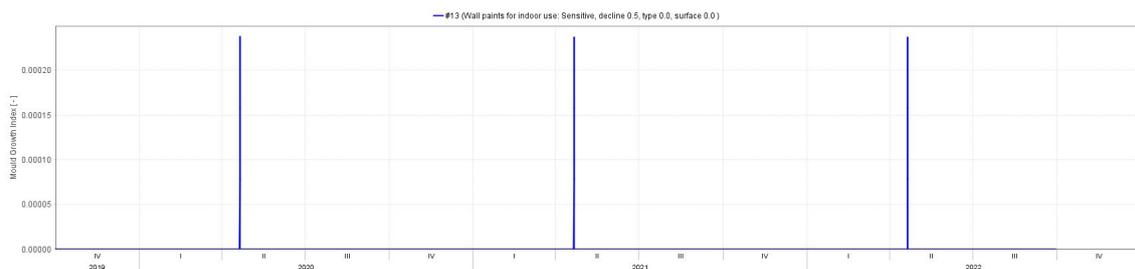


Figura N° 119: Índice de moho (-) Caso 1.

ANEXOS

Caso B

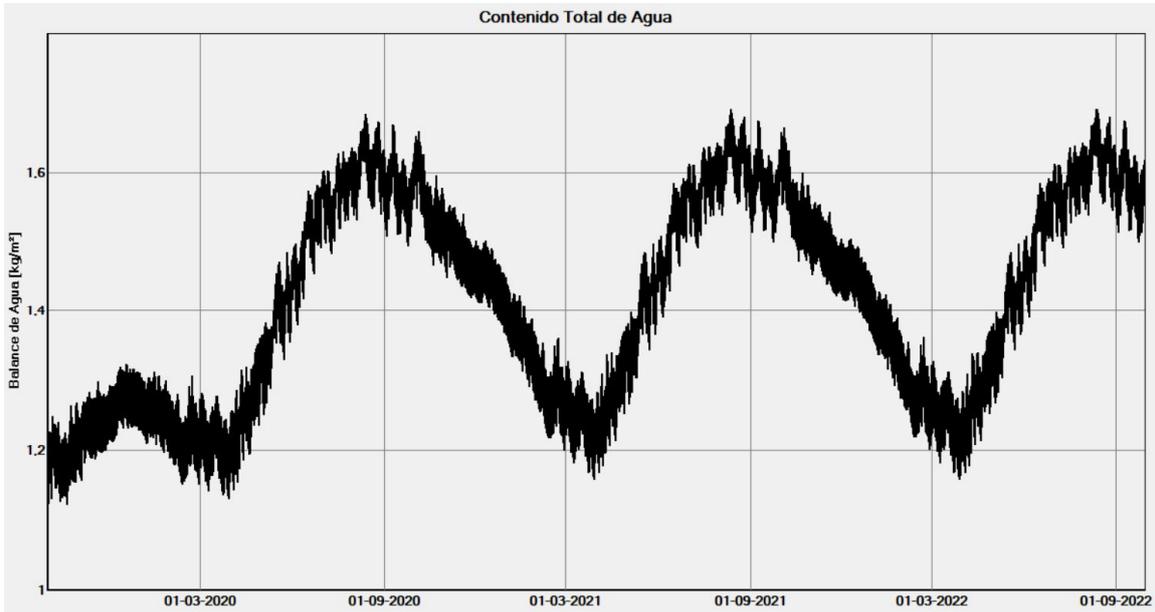


Figura N° 120: Contenido total de agua (Kg/m2) Caso 1.

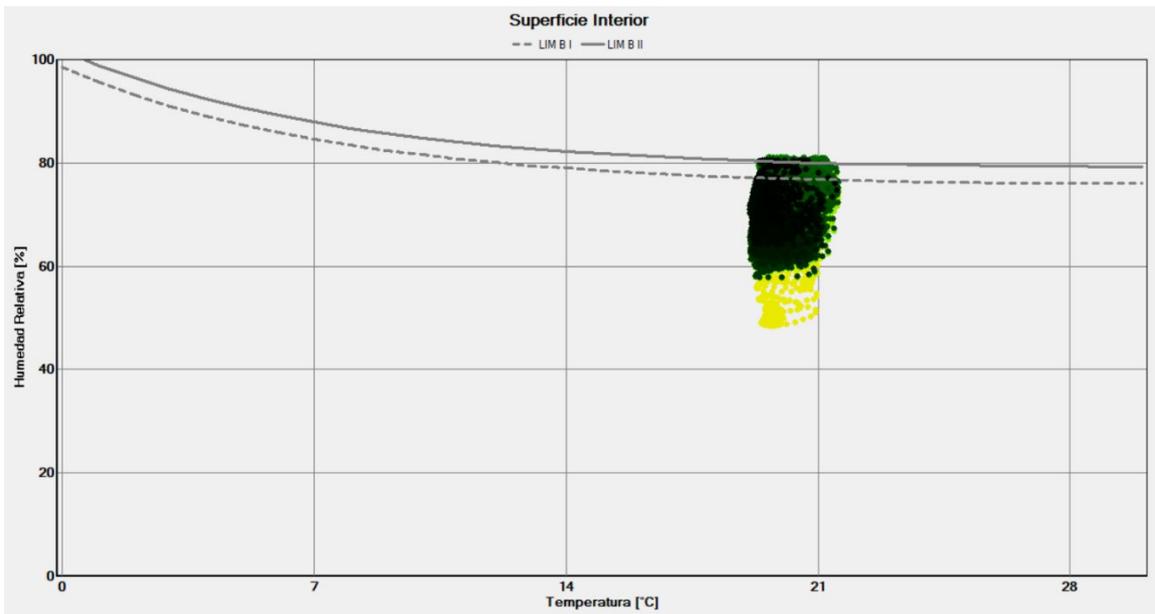


Figura N° 121: Isopletras de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM_{bau}) Caso 1.

ANEXOS

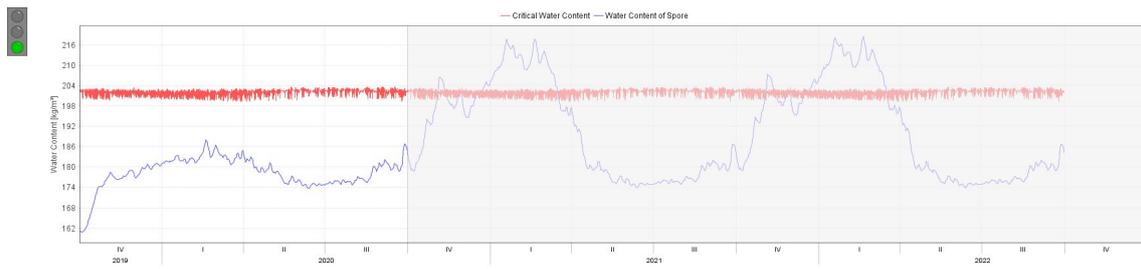


Figura N° 122: Contenido de agua de la espora vs. contenido crítico de agua (Kg/m3) Caso 1.

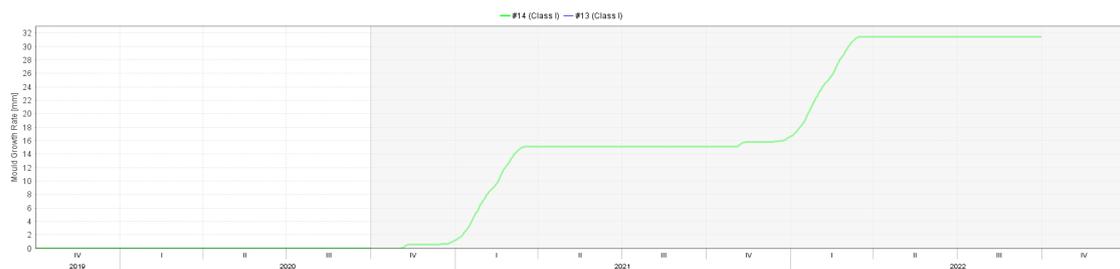


Figura N° 123: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso 1.

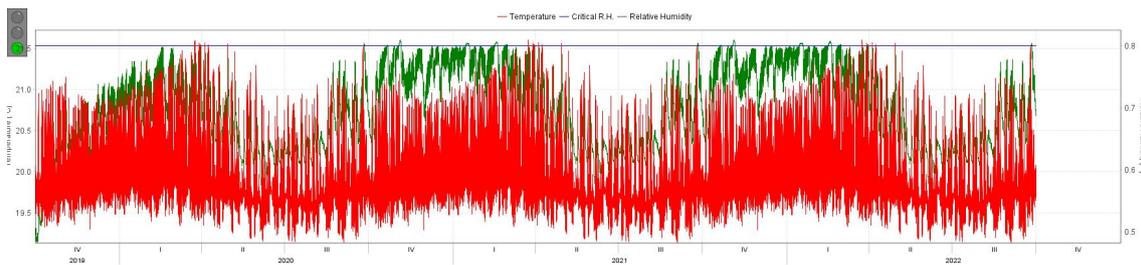


Figura N° 124: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.

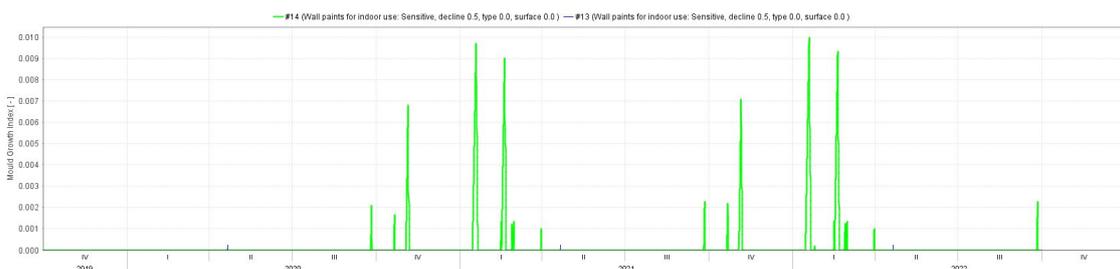


Figura N° 125: Índice de moho (-) Caso 1.

ANEXOS

Caso C

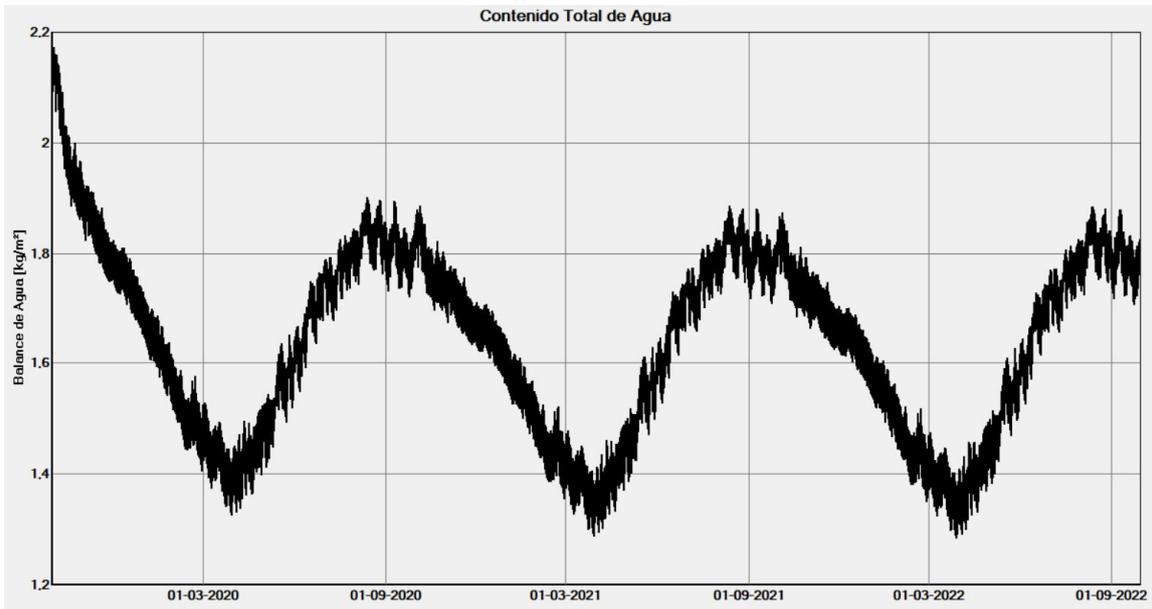


Figura N° 126: Contenido total de agua (Kg/m2) Caso 1.

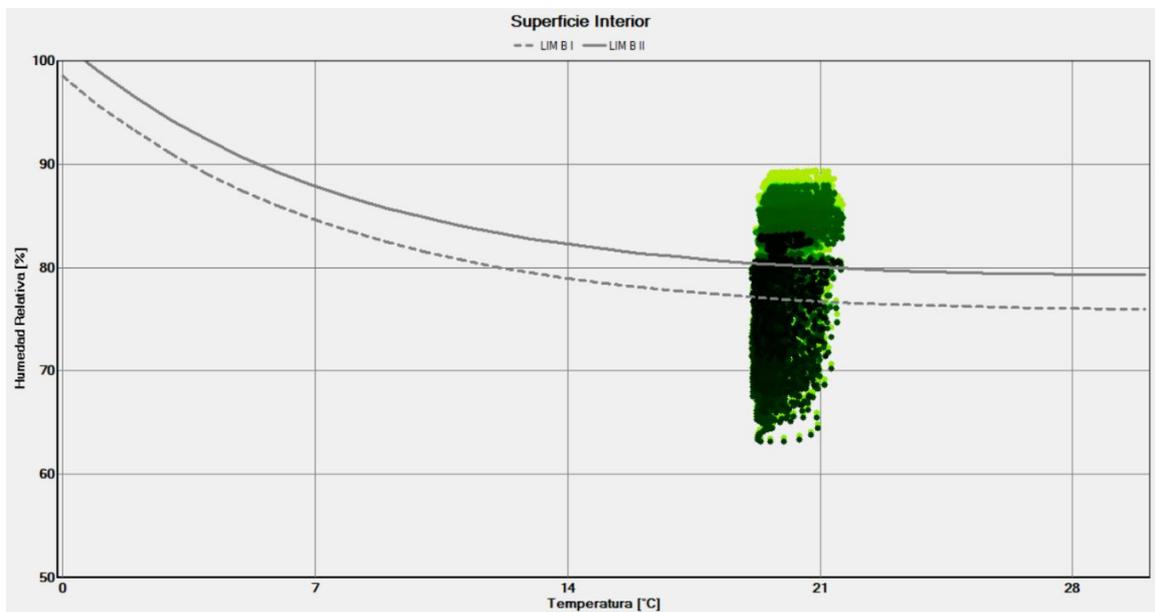


Figura N° 127: Isopletas de la superficie interior respecto a los límites de construcción (LIM_{bau}) Caso 1.

ANEXOS

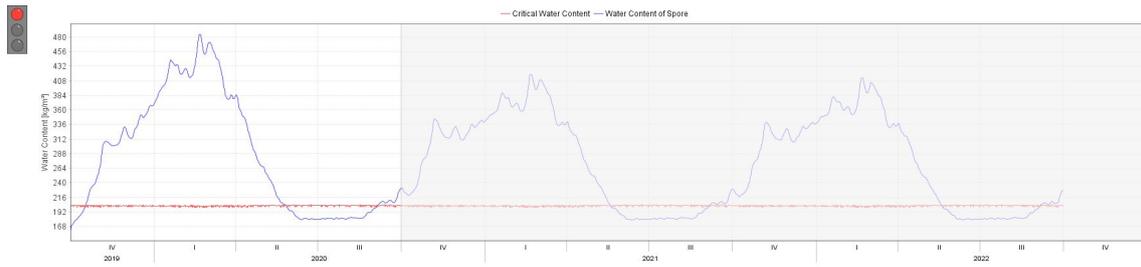


Figura N° 128: Contenido de agua de la espora vs. contenido crítico de agua (Kg/m3) Caso 1.



Figura N° 129: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso 1.

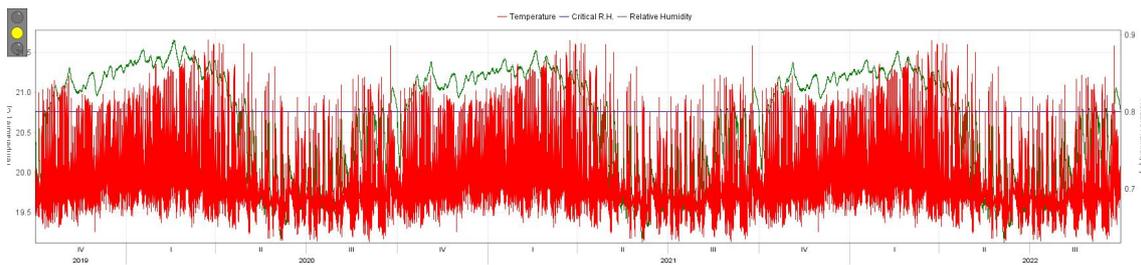


Figura N° 130: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.

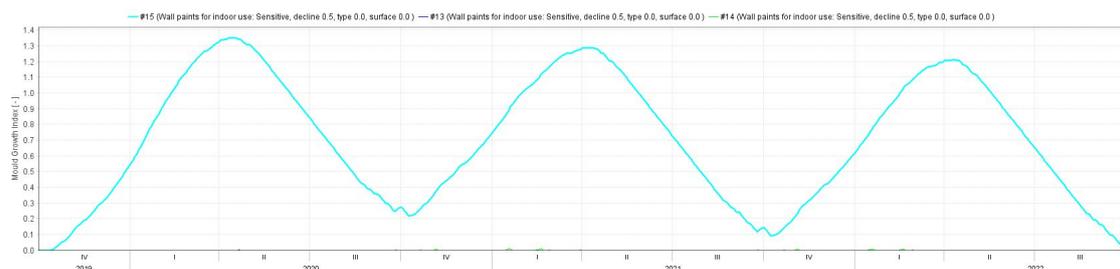


Figura N° 131: Índice de moho (-) Caso 1.

ANEXOS

Caso D (variando sobre el caso base en Bio y VTT de aquí en adelante)

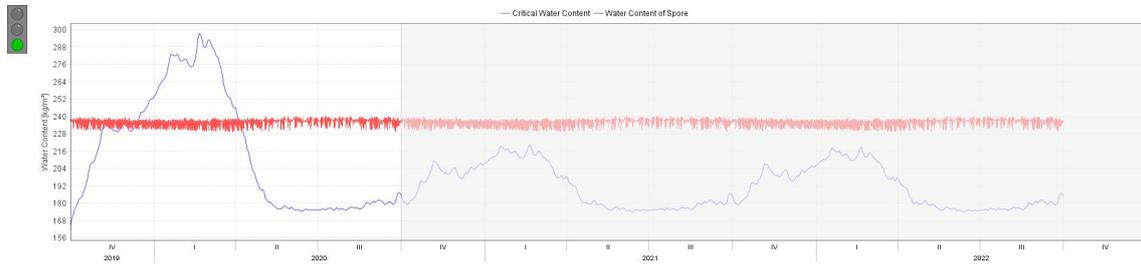


Figura N° 132: Contenido de agua de la espora vs. contenido crítico de agua (Kg/m3) Caso 1.



Figura N° 133: Tasa de crecimiento del moho (mm) Caso 1.

Caso E

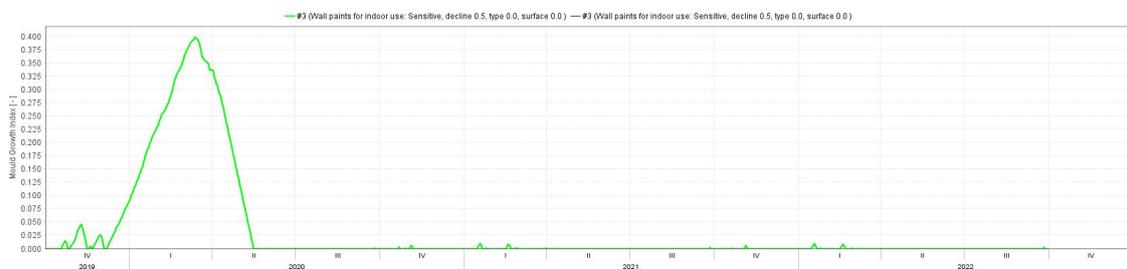


Figura N° 134: Índice de moho (-) Caso 1.

ANEXOS

Caso F

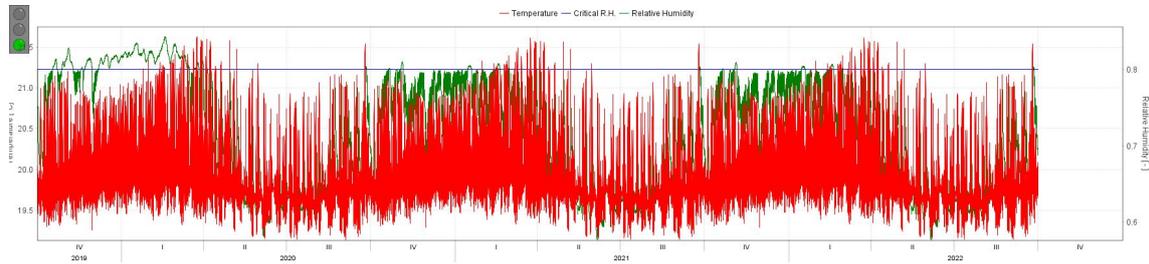


Figura N° 135: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.

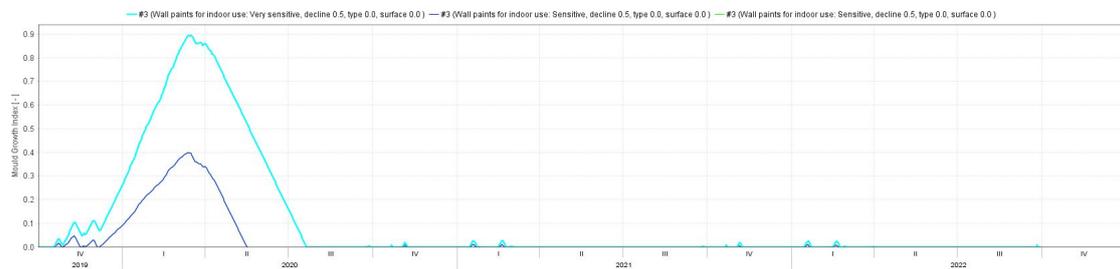


Figura N° 136: Índice de moho (-) Caso 1.

Caso G

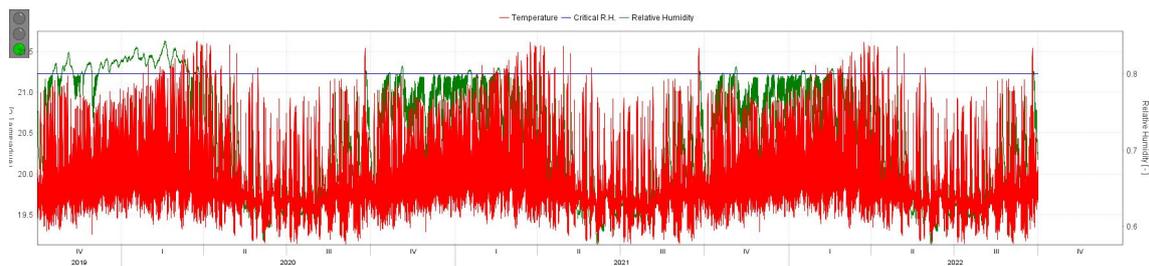


Figura N° 137: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.

ANEXOS

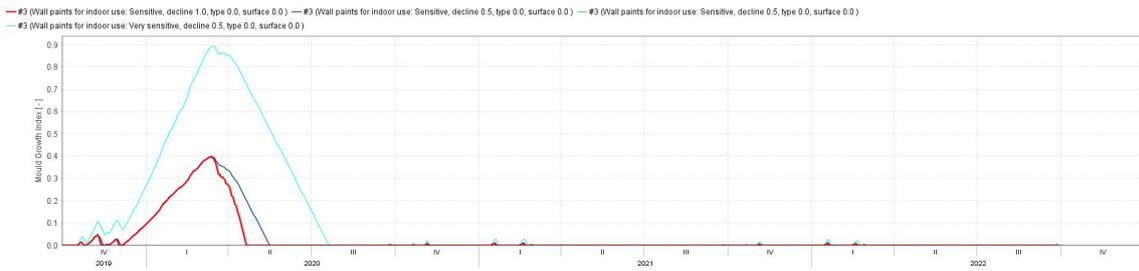


Figura N° 138: Índice de moho (-) Caso 1.

Caso H

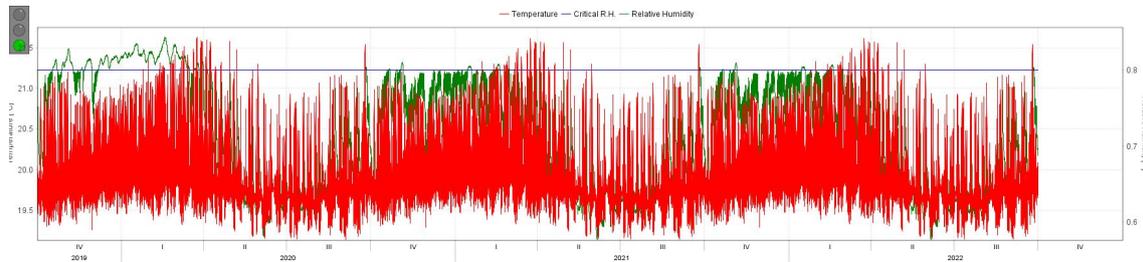


Figura N° 139: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.

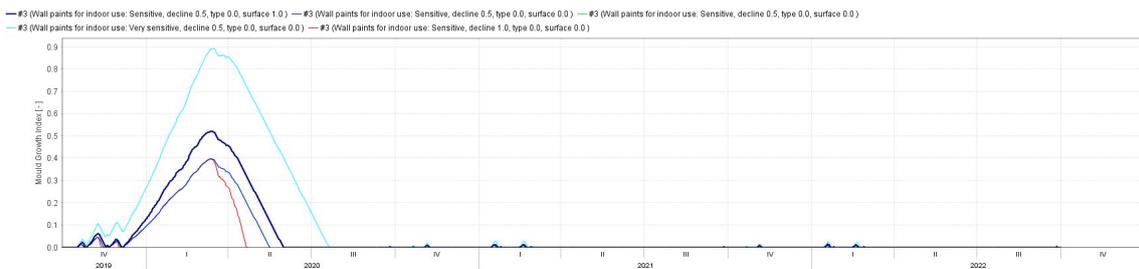


Figura N° 140: Índice de moho (-) Caso 1.

ANEXOS

Caso F+G+H

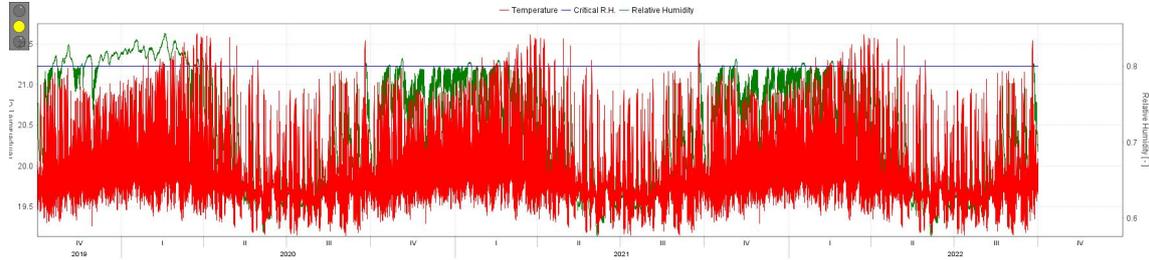


Figura N° 141: Humedad relativa crítica, humedad relativa y temperatura superficial, Caso 1.

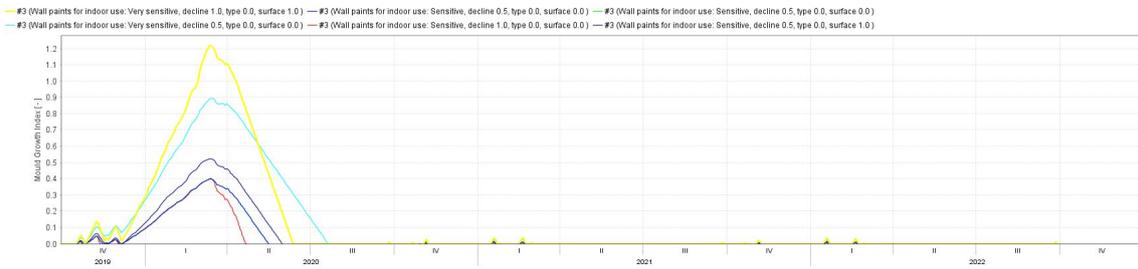


Figura N° 142: Índice de moho (-) Caso 1.

ANEXOS

Anexo 3: Características de los materiales considerados en el elemento muro calculado en el software WUFI Pro (adjunto en archivo PDF).